

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

Estudio numérico de la cota de inundación costera debida a agentes marinos

Autor: Ángel Navarro Casado

Tutor: Alejandro López Ruiz

**Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de
Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Estudio numérico de la cota de inundación costera debida a agentes marinos

Autor:
Ángel Navarro Casado

Tutor:
Alejandro López Ruiz
Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Estudio numérico de la cota de inundación costera debida a agentes marinos

Autor: Ángel Navarro Casado

Tutor: Alejandro López Ruiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A todos mis compañeros en estos cuatro años que han convertido la facultad en un lugar ameno y han pasado a formar parte de mi vida. Gracias por esos ratos dentro y fuera de la escuela, por esos viajes inesperados y por esos ratos de cervezas que no tienen fin.

Mi más sincero agradecimiento a Alejandro López Ruíz por abrirme la puerta a dos mundos apasionantes como son la investigación y la ingeniería marítima. Nunca se sabe lo que el futuro le depara a uno, pero al menos sé a lo que me gustaría dedicarme.

Finalmente gracias a mi madre, a mi hermana, a Rafa y a Marina, por aguantarme, apoyarme y animarme durante toda la carrera. Gracias por celebrar como nadie los éxitos pero, sobretodo, estar ahí en los momentos malos.

Resumen

La costa española es uno de los recursos más importantes en la economía del país. Supone una gran fuente de ingresos gracias al turismo además de atraer una gran actividad comercial a través de sus puertos, por lo que su protección es vital para el país. La presencia de temporales y tormentas, unido al aumento del nivel medio del mar de los últimos años, provocan un aumento de la cota de inundación que pueden motivar pérdidas materiales e incluso humanas.

La cota de inundación no sólo depende de la altura de ola, sino de varios parámetros del oleaje y de la playa, así como de las mareas astronómicas y meteorológicas. Entre los parámetros del oleaje más importantes se encuentran el periodo de ola, la altura de ola o la dirección del oleaje. De entre los parámetros de la playa destacan su tipología y las características que la definen, la fricción de fondo o la presencia de vegetación.

El objetivo fundamental de este trabajo de investigación es conocer y evaluar qué parámetros, tanto del oleaje como de la forma de la playa, afectan al setup de la misma, y cuantificar la influencia de cada uno de ellos en la cota de inundación. Para ello, se ha usado el programa SWASH, que permite obtener todas las magnitudes necesarias para el estudio del setup en todo el dominio de estudio.

Se han establecido 3 configuraciones de playas sintéticas en las que se han estudiado los diferentes parámetros y se han comparado en conjunto. También se ha dado una pincelada al estudio de la cota de inundación en presencia de vegetación. Finalmente se han comparado los resultados de setup obtenidos con formulaciones empíricas existentes.

Abstract

The Spanish's coast is one of the most important element for the country's economy. It is an important source of incomes due to the tourism and the great commercial activity. Hence, its protection is key for the economical and social development of the country. Storms and sea level rise associated to climate change during the last years, caused an increase in the flood risk which can trigger material or human losses.

Maximum water levels do not depend only on wave height and astronomic and/or storm surge, but also on beach parameters. Among the main wave parameters we find the wave period, the wave height or the wave direction. For the beach parameters, bottom geometries, bottom friction or the presence of vegetation are the main triggers of coastal inundation.

The main objective of this research work is deepen the knowledge of coastal inundation, specifically the wave setup, and evaluate which parameters of the wave conditions and the beach characteristics determine the setup. The influence of each parameter on flood elevation is also quantified using the SWASH numerical model.

Three synthetic beach configurations have been established where every parameter have been studied and compared as a group. The flood elevation in presence of vegetation has also been introduced. Finally, setup results have been compared with other empirical formulations.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos y estructura del proyecto	4
2 Setup y setdown. Tensor de radiación	5
2.1 Introducción	5
2.2 Setup y setdown	6
2.3 Desarrollo matemático. Tensor de radiación	7
2.4 Formulaciones empíricas	9
2.5 Runup	10
3 Metodología	11
3.1 Introducción	11
3.2 SWASH. Características y limitaciones	12
3.3 Metodología de cálculo	15
4 Resultados	31

4.1	Introducción	31
4.2	Perfil inclinado	31
4.3	Perfil en equilibrio dinámico	37
4.4	Perfil en equilibrio dinámico con barra	43
4.5	Presencia de vegetación	50
4.6	Comparación resultados del modelo con distintas formulaciones	54
5	Conclusiones. Recomendaciones	59
5.1	Conclusiones	59
5.2	Recomendaciones	60
5.3	Futuras líneas de investigación	61
	<i>Índice de Figuras</i>	63
	<i>Índice de Tablas</i>	65
	<i>Bibliografía</i>	67

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice Abreviado</i>	VII
1 Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	3
1.3 Objetivos y estructura del proyecto	4
2 Setup y setdown. Tensor de radiación	5
2.1 Introducción	5
2.2 Setup y setdown	6
2.3 Desarrollo matemático. Tensor de radiación	7
2.3.1 Fuera de la zona de rompientes	8
2.3.2 Dentro de la zona de rompientes	8
2.4 Formulaciones empíricas	9
2.5 Runup	10
3 Metodología	11
3.1 Introducción	11
3.2 SWASH. Características y limitaciones	12
3.2.1 Introducción	12
3.2.2 Ecuaciones de gobierno	12
3.2.3 Condiciones de contorno	14
3.2.4 Relación con el modelo Boussinesq	14
3.3 Metodología de cálculo	15
3.3.1 Introducción	15
3.3.2 Configuraciones de playas	16
Batimetría inclinada	16
Perfil en equilibrio dinámico	16
Perfil en equilibrio dinámico con barra	17
3.3.3 Variables analizadas	19
Altura de ola significativa	19
Periodo de ola	19

Fricción de fondo	19
Característica de la batimetría usada	19
Presencia de vegetación	22
3.3.4 Casos estudiados	22
3.3.5 Comentarios sobre los resultados obtenidos	27
4 Resultados	31
4.1 Introducción	31
4.2 Perfil inclinado	31
4.2.1 Caso base	31
4.2.2 Variación de altura de ola	33
4.2.3 Variación del periodo	33
4.2.4 Variación de la fricción de fondo	34
4.2.5 Variación de la pendiente del fondo	35
4.2.6 Comparación de todos los parámetros	35
4.3 Perfil en equilibrio dinámico	37
4.3.1 Caso base	37
4.3.2 Variación de altura de ola	39
4.3.3 Variación del periodo	39
4.3.4 Variación de la fricción de fondo	40
4.3.5 Variación del valor A	41
4.3.6 Comparación de todos los parámetros	41
4.4 Perfil en equilibrio dinámico con barra	43
4.4.1 Caso base	43
4.4.2 Variación de altura de ola	45
4.4.3 Variación del periodo	45
4.4.4 Variación de la fricción de fondo	46
4.4.5 Variación del valor A	47
4.4.6 Variación de delta	47
4.4.7 Comparación de todos los parámetros	48
4.5 Presencia de vegetación	50
4.6 Comparación resultados del modelo con distintas formulaciones	54
4.6.1 Perfil inclinado	54
4.6.2 Perfil en equilibrio dinámico	55
4.6.3 Perfil en equilibrio dinámico con barra	57
5 Conclusiones. Recomendaciones	59
5.1 Conclusiones	59
5.2 Recomendaciones	60
5.3 Futuras líneas de investigación	61
<i>Índice de Figuras</i>	63
<i>Índice de Tablas</i>	65
<i>Bibliografía</i>	67

1 Introducción

1.1 Introducción

A lo largo de la historia, el ser humano ha ido buscando asentarse en lugares cercanos a ríos o a la costa. Esta práctica ha sufrido una aceleración en los últimos tiempos generando una superpoblación en las zonas cercanas al mar. Los asentamientos en la zona costera generan un beneficio enorme, ya que dan acceso a numerosos recursos, además de suponer un lugar de comercio y dotarlo con una mejora socio-económica.

La zona costera en España supone una importante fuente de ingreso y posee un gran interés económico y ambiental. España dispone de casi 6000 kilómetros de costa, y gran parte de toda esa longitud son lugares protegidos o zonas urbanizadas en las que se desempeñan actividades turísticas, unos de los pilares de la economía española.

La costa es uno de los elementos más dinámicos de la naturaleza ya que anualmente soporta procesos de erosión, sedimentación, transporte de sedimentos o inundación, provocando afecciones a infraestructuras costeras dejándolas fuera de servicio o provocando su colapso.

La gran variación de la morfología costera debido al clima marítimo puede generar enormes daños materiales, e incluso, humanos. Es muy común que en las noticias se hable de pérdidas de playas o desplomes de paseos marítimos en épocas de temporales. Un cambio en el litoral debido a un temporal puede producirse en horas y tardar años en recuperarse.

El cambio climático es el principal causante del aumento del nivel medio del mar, por lo que estos casos son cada vez más frecuentes y difíciles de evitar. La vulnerabilidad del hombre ante estos fenómenos, les ha obligado a actuar para protegerse frente a la acción del mar, construyendo protecciones contra la acción costera.

Conocida la problemática, es necesario analizar las causas que generan estas pérdidas, prever cuando se producirán y los daños que causarán con el objetivo de evitarlos mediante una actuación en la zona. Estas pérdidas son consecuencia, entre otras cosas, de un aumento del nivel del mar generadas principalmente por las mareas meteorológicas. Un huracán o una tormenta tropical consiste en grandes campos de viento generados por una combinación de un efecto barométrico local, un efecto cinemático debido al movimiento del sistema meteorológico, y un efecto dinámico del estrés del viento en el océano superficie. Estas tormentas generan vientos de más de 200 km/h en grandes áreas en el océano, provocando cierto oleaje que se traslada a la costa; son las conocidas



Figura 1.1 Destrozos en el paseo marítimo de Cubelles (Barcelona) debido a un temporal. Enero 2017.

mareas meteorológicas que varían el nivel del agua.

La variación del nivel de agua resultante suele ser similar a una ola, y a menudo puede ser tratado con éxito como ondas largas. Para ciertos lugares, las tormentas pueden causar inundaciones inmensas y la pérdida de miles de vidas. Uno de los parámetros que sirve de utilidad en la ingeniería costera para evaluar el riesgo de inundación es el runup (máximo alcance de la costa). El runup se compone de dos elementos principalmente: el setup (aumento del nivel medio del mar) y el swash (oscilaciones por rotura de olas).

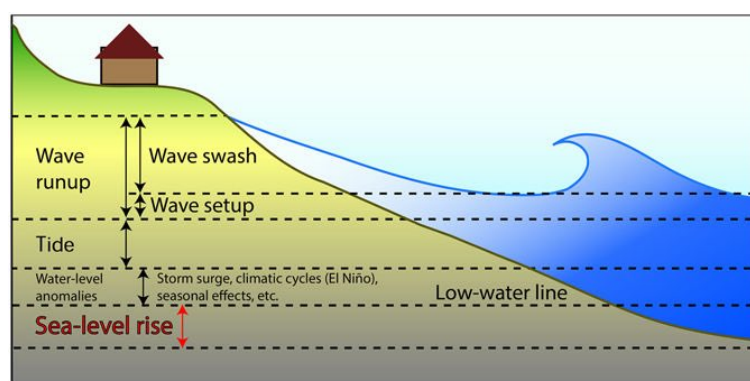


Figura 1.2 Zona de rompientes. Run-up, set-up y swash.

El fenómeno de inundación se define como la ocupación por parte del agua de zonas que habitualmente están libres de ésta, por desbordamiento de ríos, torrentes o ramblas, por lluvias torrenciales, deshielo, por subida de las mareas por encima del nivel habitual, por maremotos, huracanes, entre otros.

A lo largo de este proyecto nos centraremos solamente en la zona costera, pudiendo extenderse algunos resultados al sistema fluvial.

Entre los procesos involucrados en el fenómeno de inundación costera, el oleaje, unos de los principales causantes, presenta un comportamiento aleatorio. Además, el remonte del oleaje depende de diversos factores, como la forma y pendiente de la zona de rompientes, de las características del oleaje o de posibles barreras naturales o artificiales que haya. Además de esto, hay que añadir la



Figura 1.3 Inundación por crecida del río Ebro en Pradilla (Zaragoza). Abril 2018.

no-linealidad en la transformación del oleaje y en fenómenos como reflexión o refracción. Todos estos elementos complican la evaluación exacta de la cota de inundación, por lo que es necesario el conocimiento de la influencia de cada parámetro por separado.

1.2 Antecedentes

A pesar de ser el setup uno de los aspectos más importantes y determinantes en el estudio de la inundación costera, no existe un gran número de investigaciones sobre este aspecto. Conocer y cuantificar los valores máximos de setup con diferentes configuraciones de oleaje y de playa nos ayudaría a prever inundaciones, además de ser de ayuda a la hora del desarrollo urbanístico y de construcción de infraestructuras en la costa. También nos permitiría conocer los valores máximos del mar en época de temporal y poder tener valores aproximados de cotas de inundación (asociados a periodos de retorno) dado la aleatoriedad del mar y de la meteorología. Estas son algunas de las razones por las que se ha considerado necesario la realización de un trabajo de investigación del setup.

Como se ha mencionado anteriormente, el estudio de todos los parámetros que influyen en el valor de setup de una playa es complejo, por lo que se ha decidido evaluar cada uno de los parámetros por separado y establecer una conexión entre el valor del setup y la variación de cada uno de dichos parámetros.

El estudio del setup se va a realizar con SWASH. La elección de este modelo numérico ha sido por ser un modelo relativamente complejo capaz de simular los principales procesos físicos involucrados en la inundación del litoral debida a la acción del oleaje, además de poseer la opción de trabajar de modo no hidrostático, dándole mayor veracidad a los resultados y asemejándose más con la realidad.

Al ser un modelo de reciente creación, los trabajos realizados con dicho modelo en España son escasos por lo que sirve como una de las primeras tomas de contacto de este modelo numérico en la investigación costera de nuestro país. Uno de los objetivos de empleo de este modelo es conseguir el desarrollo y la normalización de uso de éste. La versatilidad y el gran número de procesos físicos que pueden incluirse, permite asemejar bastante el modelo a la realidad, por lo que se considera a SWASH como un modelo muy completo y con muchas aplicaciones para la Ingeniería Civil en general y la Ingeniería Hidráulica en particular.

La mayoría de trabajos de investigación realizados con este modelo numérico se localizan en Holanda, más concretamente en Delft (lugar de desarrollo de este modelo numérico) y que han servido de guía para una mayor comprensión del funcionamiento de este modelo.

1.3 Objetivos y estructura del proyecto

El objetivo fundamental de este Trabajo Fin de Grado es conocer y evaluar qué parámetros, tanto del oleaje como de la forma de la playa, afectan al setup de la misma, y cuantificar la influencia de cada uno de ellos en la cota de inundación. Para ello, se ha usado el programa SWASH, que permite obtener todas las magnitudes necesarias para el estudio del setup en todo el dominio de estudio.

Para la consecución de este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Aplicar un modelo numérico avanzado (SWASH) para el cálculo del setup en playas, entendiendo la física del problema e identificando las limitaciones del mismo.
2. Analizar la influencia de variables del oleaje definiendo parámetros que definen un espectro de oleaje como altura de ola significativa, periodo y ángulo de oleaje.
3. Analizar la influencia de la geometría de la playa variando la configuración de playa, y sus respectivos valores que las definen, y la fricción del fondo marino.
4. Establecer una serie de recomendaciones para el estudio del setup del oleaje.

A lo largo de este trabajo se definirá el concepto de setup y, a partir de un modelo numérico, se calculará el valor del setup máximo para distintas configuraciones de playas, distintas características física en la playa y de distintos espectros de oleaje (variación de altura significativa y periodo de ola).

Una vez expuesto los resultados y comparados unos con otros, se podrá sacar una conclusión de la mejor configuración de playa, además de que elementos son los más eficaces para reducir el setup de la playa. La estructura del proyecto será la siguiente:

- **Capítulo 1:** Se justifica la investigación, antecedentes a esta investigación y estructura del documento.
- **Capítulo 2:** Se define y caracteriza el setup. Desarrollo matemático del setup.
- **Capítulo 3:** Se describe del modelo a utilizar en la investigación playas y se define la metodología llevada a cabo para el cálculo de valores del setup.
- **Capítulo 4:** Se definen los resultados obtenidos en 1D y la comparación entre los distintos parámetros que se han establecido.
- **Capítulo 5:** Análisis de resultados obtenidos y conclusión final.

2 Setup y setdown. Tensor de radiación

2.1 Introducción

Dentro del área de las cercanías de la costa la zona más importante, por la cantidad de transporte de sedimentos que se genera, es la zona de rompientes. Esta franja de la playa representa una región de profundidad somera, donde comienza la rotura del oleaje, fenómeno que está asociado con la transformación de energía ordenada proveniente de aguas profundas a turbulencia y calor. Como resultado de la acción de estos procesos disipativos, se genera una intensa agitación de sedimentos del fondo marino. Más aún el proceso de rotura es capaz de configurar una línea de costa, por medio de las fuertes corrientes transversales y longitudinales que se generan como consecuencia de su acción sobre la playa.

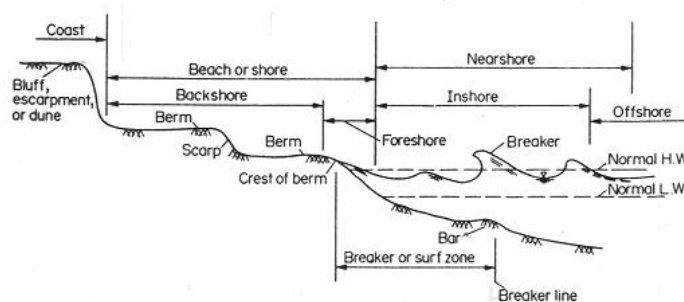


Figura 2.1 Localización de zona de rompientes o 'surf zone'.

La zona de rompientes comprende una de las áreas más activas en la naturaleza respecto a la dinámica de los mecanismos físicos presentes. En esta estrecha franja de la zona costera, la energía del oleaje se disipa parcialmente en calor a través de la turbulencia y se transforma en:

- Ondas cortas y largas que son parcialmente reflejadas de nuevo hacia el mar.
- Sobre-elevación del nivel medio del mar (setup).

- Corrientes de todo tipo, que colaboran junto con los movimientos oscilatorios y turbulentos, en el transporte neto del sedimento y en los cambios de la morfología de las playas.

En el desarrollo de este trabajo nos centraremos en uno de los mecanismos mencionados anteriormente como es el setup.

2.2 Setup y setdown

El setup es un incremento del nivel medio del mar que se produce en la zona de rompientes y consiste en una pendiente ascendente del agua en la dirección hacia la tierra. Esta pendiente es inferior a la de la playa, con lo que el agua interseca la playa en un punto de ésta. También, en la zona previa al punto donde rompen las olas, se produce una zona de setdown, una depresión en la superficie media del agua donde las olas sufren rápidas transformaciones de sus alturas y energía [2].

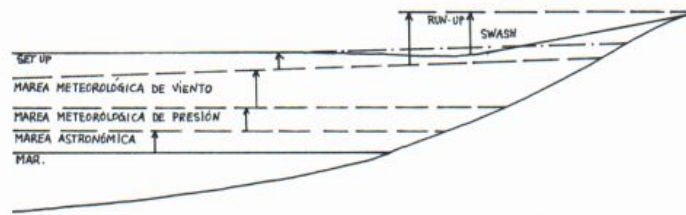


Figura 2.2 Set-down en zona de rotura y set-up.

A medida que las olas se acercan a la costa, tanto la energía como la cantidad de movimiento de la onda se transmiten en la dirección de onda. Al romperse, la energía se disipa generando turbulencia. Sin embargo, la cantidad de movimiento de la onda no se disipa sino que se transfiere a la columna de agua que resulta en una pendiente de la superficie de agua para equilibrar la componente en tierra del flujo de momento. Si las olas son irregulares, el setup incluye un componente dinámico que oscila con el periodo del grupo de ondas y puede haber cierta resonancia débil que amplifique dicho fenómeno [20].

Los análisis teóricos llevados a cabo por Longuet-Higgins and Stewart [10] determinan que el flujo de momento de las olas es el responsable de ambos fenómenos, teoría que ha sido verificada por ensayos de campo y detallados ensayos de laboratorio, como los de Bowen et al. (1968), y extensas series de experimentos en canales de oleaje obtenidos por Van Dorn (1976) [2].

Es interesante el estudio de este fenómeno en el ámbito de la ingeniería, sobre todo en el análisis de inundaciones debido a tormentas severas y agua oscilante que pueda generar cierto riesgo en zonas recreativas costeras o incluso en la naturaleza. La contribución del setup bajo eventos extremos de tormenta puede ser sustancial, agregando metros a los niveles de agua elevados [20].

2.3 Desarrollo matemático. Tensor de radiación

Para la comprensión de este fenómeno, nos interesa conocer el comportamiento del mar en la zona de rompientes. Esta zona se conoce como 'surf zone'. Cerca de la costa, la altura de la ola está controlada en gran medida por la profundidad del agua y los términos no lineales se hacen importantes por el asomeramiento del oleaje. Si se consideran estos términos, la trayectoria de las partículas sometidas a un movimiento ondulatorio del oleaje es una elipse abierta que implica un transporte neto de masa y de cantidad de movimiento. La celeridad de la partícula depende del nivel medio del mar y de la sobreelevación de la superficie siendo mayor en la zona de la cresta que en el seno de la ola [11].

$$c \sim \sqrt{g * (h + \eta)} \quad (2.1)$$

A pesar de considerar no linealidad en la propagación, las ecuaciones de conservación de la masa y cantidad de movimiento deben cumplirse, lo que implica la aparición de elementos o mecanismos que compensen estos excesos o defectos en la zona de rompientes:

- Variaciones del nivel medio del mar (η)
- Generación de corrientes
- Undertow

Para explicar el fenómeno de set-up y generación de corriente litoral, Longuet-Higgins and Stewart [10] desarrollan la teoría del tensor de radiación. La tensión de radiación se define como el exceso de cantidad de movimiento debido a la presencia de olas. Surge del movimiento orbital de partículas de agua en las olas. Los movimientos de estas partículas producen una fuerza neta en la dirección de propagación (SXX) y una fuerza neta en ángulos rectos a la dirección de propagación (SYY). Es un tensor de segundo orden compuesto por 2.2, 2.3 y 2.4:

$$S_{xx} = E \left[n(\cos^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.2)$$

$$S_{yy} = E \left[n(\sin^2(\theta) + 1) - \frac{1}{2} \right] \quad (2.3)$$

$$S_{xy} = S_{yx} = \frac{E}{2} \sin 2\theta \quad (2.4)$$

Donde E es la densidad de energía de la onda, n la relación entre la celeridad de grupo y la celeridad de onda y θ es el ángulo entre la dirección de onda y el eje x.

Las ecuaciones de cantidad de movimiento 2.5 y 2.6 en estado estacionario obtenidas en un periodo corto de oleaje e incluyendo los efectos de la tensión de viento y fricción de fondo son:

$$\frac{\partial(\eta_{wind} + \eta_{wave})}{\partial x} = - \frac{1}{\rho g(h + \eta)} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} - \tau_{sx} + \tau_{bx} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial(\eta_{wind} + \eta_{wave})}{\partial y} = - \frac{1}{\rho g(h + \eta)} \left(\frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} - \tau_{sy} + \tau_{by} \right) \quad (2.6)$$

Donde η_{wind} es la componente debida a la tensión del viento, η_{wave} es el set-up, h la profundidad del agua y τ_{sx} y τ_{bx} las tensiones de cizalladura de superficie y fondo respectivamente.

La solución más simple es la propagación directa hacia la costa ($S_{xy}=0$) y considerando tensiones de cizalladura despreciables.

$$\frac{\partial(\eta_{wave})}{\partial x} = -\frac{1}{\rho g(h+\eta)}\left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x}\right) \quad (2.7)$$

La ecuación 2.7 tiene dos soluciones, una fuera de zona de rompientes y otra dentro de la zona de rompientes.

2.3.1 Fuera de la zona de rompientes

Aplicando la condición de contorno de que la variación del nivel medio es nula en profundidades indefinidas y asumiendo que las variaciones del nivel medio son muy pequeñas con respecto a la profundidad ($\eta \ll h$), la ecuación queda:

$$-\rho g \frac{\partial(\eta h)}{\partial x} = \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (2.8)$$

Integrando 2.8 queda :

$$\eta = -\frac{1}{\rho g h}(S_{xx} + K_2) \quad (2.9)$$

Aplicando la condición de contorno:

$$K_2 = -S_{0xx} \quad (2.10)$$

Siendo S_{0xx} el valor de la componente x del tensor de radiación en profundidades indefinidas. El nivel medio describe una curva que decrece hasta alcanzar un nivel mínimo en el punto de rotura. A esta variación fuera de la zona de rompientes se le denomina setdown.

2.3.2 Dentro de la zona de rompientes

Dentro de la zona de rompientes hay que resolver S_{xx} imponiendo como condición de partida el nivel mínimo que se alcanza en la zona de rotura. También se le aplican ciertas simplificaciones y consideraciones que se producen en profundidades reducidas.

- $n = 1$
- $\cos\theta = 1$
- Altura de ola rota $Hb = \gamma(\eta + h)$
- $E = \frac{1}{8}\rho g H^2$

Desarrollando la ecuación de 2.2 nos queda lo siguiente:

$$S_{xx} = \frac{3}{2}E = \frac{3}{16}\rho g H^2 \quad (2.11)$$

Si tenemos que:

$$\rho g \frac{\partial(\eta h)}{\partial x} = \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (2.12)$$

Se deduce que:

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.13)$$

Desarrollando la ecuación 2.13 da la variación del nivel medio dentro de la zona de rompiente, denominada setup que crece linealmente conforme nos acercamos a la costa. La expresión de la variación del nivel medio queda entonces:

$$\eta = \begin{cases} \frac{1}{\rho g h} (S_{0xx} - S_{xx}) & \text{si } x < x_b \\ \eta_b + K(h + H_b) & \text{si } x \geq x_b \end{cases} \quad (2.14)$$

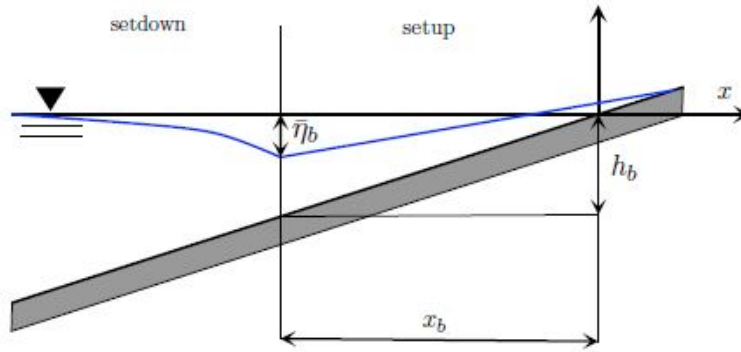


Figura 2.3 Representación set-up y set-down formula matemática.

2.4 Formulaciones empíricas

Existen numerosas formulaciones empíricas que estiman el valor del setup máximo en función de los parámetros del oleaje y de los parámetros que configuran una playa.

Guza and Thornton [8] proponen, a partir de medidas en playa del sur de California, que el máximo setup de la línea de orilla por encima del nivel del agua en reposo es:

$$\eta_{max} = 0.17H_0 \quad (2.15)$$

Pero Holman and Sallenger [9] encuentran que la correlación directa entre la altura de ola y el setup tiene gran dispersión, por lo que proponen normalizar el setup máximo con la altura de ola en aguas profundas y relacionarlo con el parámetro de Iribarren:

$$\frac{\eta_{max}}{H_0} = 0.45\xi_0 \quad (2.16)$$

Siendo el parámetro de Iribarren:

$$\xi_0 = \frac{\tan\beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (2.17)$$

Los medidas se realizaron en lugares con carrera de marea larga, resultando medidas de setup en marea baja más dispersos que las medidas en marea alta, aunque la tendencia global fue satisfactoria.

Los resultados de Holman y Sallenger [9] indican que dependiendo del número de Iribarren, la proporcionalidad del setup y altura de ola significativa en aguas profundas puede ser 0.5 veces o más grande que el valor de 0.17 propuesto por Guza y Thornton [8].

2.5 Runup

Además del setup, existe en runup que es la extensión vertical máxima de la onda ascendente en na playa sobre el nivel del agua en reposo [17], y se produce después de que la ola rompa sobre la playa, produciéndose el movimiento hacia delante de la masa de agua hasta que la energía de la ola que no ha sido disipada en el proceso de rotura se invierte en subir por el talud [2].

Se ha descubierto que el runup total consta de tres partes principales:

- El setup, que determina la posición media de la línea de orilla por encima de la cual las olas individuales recorren la cara de la playa
- Las fluctuaciones del setup
- Las componentes infragravitatorias ($T > 20\text{seg}$) de las oscilaciones del runup

3 Metodología

3.1 Introducción

Existen numerosos tipos de modelos numéricos que nos permiten conocer e intuir el comportamiento del oleaje en regiones costeras e infraestructuras costeras como puertos o diques. Los dos tipos principales de modelos numéricos son los tipos Boussinesq y los modelos no hidrostáticos. Estos modelos son capaces de modelar con precisión la evolución lineal del campo de ondas.

Tradicionalmente, los modelos Boussinesq han sido los más eficientes para la propagación de ondas ya que fueron diseñados para ello. Han sido utilizados en numerosas ocasiones para fines de la ingeniería civil y tiene como principios:

- Los modelos de onda tipo Boussinesq son de resolución de fase, describen el comportamiento de onda individual.
- Dentro del modelo de onda, el flujo 3D se escribe en ecuaciones 2D.
- Los modelos de onda del tipo Boussinesq son capaces de reproducir los fenómenos de onda más importantes como: shoaling, refracción, difracción, rotura de olas, disipación de fondo, movimiento de la línea de costa (runup y rundown), reflexión parcial, transmisión de onda, no- interacciones lineales de onda de onda, difusión de frecuencia y propagación direccional.

Algunos de los programas que modelan el oleaje con un modelo tipo Boussinesq son MIKE21 o BOUSS 2D.

Sin embargo este tipo de modelo tiene ciertas limitaciones como no poder usarse si la suposición de presión hidrostática no es válida. Este es el caso de ondas que se propagan por un fondo inclinado o de olas cortas.

Los modelos no hidrostáticos, como ya dice su propio nombre, no asumen presión hidrostática. Los términos no hidrostáticos los encontramos en las ecuaciones de momento horizontal. Además se incluye ecuaciones de momento vertical en aguas someras. Esta inclusión de la parte no hidrostática en las ecuaciones implica un mayor tiempo computacional [1].

Existen numerosos programas que tienen en cuenta la presión no hidrostática pero de diferente manera. Algunos programas separan la presión hidrostática de la no hidrostática y solo incluyen la parte no hidrostática en el área que tiene una gran influencia para minimizar coste computacional. Otros programas tienen en cuenta ambas presiones en todo momento.

Al contrario que las ecuaciones de Boussinesq, la coordenada vertical no se elimina de las ecuaciones en derivadas parciales 3D. En cambio, la vertical se discretiza dividiéndola en capas verticales.

En este trabajo nos centraremos en los modelos no hidrostáticos, más concretamente en SWASH, para poder realizar el estudio de la cota de inundación de las diferentes tipologías de playas, teniendo en cuenta la presión no hidrostática en la zona de rompientes.

3.2 SWASH. Características y limitaciones

3.2.1 Introducción

El modelo de resolución de fase numérica SWASH (Simulating WAVes till SHore) es un modelo no hidrostático que se puede utilizar para simular fenómenos de flujo rotacional y fenómenos de transporte de superficie libre no hidrostática en una, dos o tres dimensiones. El objetivo principal del programa es proporcionar un modelo robusto y eficiente que se pueda aplicar a diferentes escalas de tiempo y espacio para simular las ondas de superficie y las corrientes en aguas someras [18].

Las ecuaciones que gobiernan al modelo son las ecuaciones no lineales de aguas someras, incluida la presión no hidrostática y algunas ecuaciones de transporte, y proporcionan una base general para simular:

- Transformaciones de la onda en zonas de swash y surf debido a interacciones no lineales onda-onda, interacciones onda-corriente, interacciones onda-estructuras, amortiguamiento por vegetación y rotura de olas y runup.
- Cambios complejos de flujo rápidamente variados que se producen por rotura de diques o tsunamis.
- Flujos en estuarios, lagos y ríos.
- Mareas, circulación oceánica a gran escala y mareas ciclónicas.

El modelo se conoce como un modelo de flujo de onda y es esencialmente aplicable en la región de costa hasta la orilla. Como un resultado, SWASH permite que todo el proceso de modelado se lleve a cabo en cualquier área de interés. Esto incluye aplicaciones costeras de pequeña escala, como olas que se acercan a una playa, penetración de olas en un puerto, olas de inundación en un río, la intrusión de sal en un estuario, y los sistemas oceánicos, de plataforma y costeros a gran escala impulsados por Coriolis.

SWASH está cerca de SWAN (Simulating WAVes Nearshore) con respecto al pragmatismo empleado en el desarrollo del código en el sentido que comprende a veces que es necesario por razones de eficiencia y robustez. Por un lado, proporciona estabilidad numérica y robustez, y por otro lado proporciona resultados precisos en un tiempo de respuesta razonable [18].

3.2.2 Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones que SWASH resuelve se basan en las ecuaciones no lineales de aguas someras, incluida la presión no hidrostática y se pueden derivar de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes se basan en la conservación de la masa y el momento. Al usar la descomposición de Reynolds (dividiendo la velocidad en una media (u_1) y parte fluctuante

(primera), es decir, $u = u_1 + u'$ y promediando, da como resultado las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynold (RANS). SWASH resuelve las ecuaciones RANS (junto con la continuidad) promediando sobre la vertical para cada capa vertical [13].

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\xi} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\xi} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{h} = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) \quad (3.3)$$

Donde:

- x e y son las coordenadas horizontales
- t es el tiempo
- g la gravedad
- ξ es la elevación del agua, medida desde el nivel medio
- d es la profundidad del agua
- h es la profundidad total ($\xi + d$)
- q es la presión no-hidrostática
- c_f es el coeficiente de fricción

Las ecuaciones no lineales de aguas someras incluyen un término con cambio local en el tiempo, dos términos de advección y un término de gravedad (cuatro primeros términos). También se tiene en cuenta el término de presión no hidrostática, la fricción del fondo y los términos de tensión turbulenta.

La elevación de la superficie $\xi(x,y,t)$ es una función de las coordenadas horizontales y el tiempo. Un inconveniente de este enfoque es que las ondas de vuelco no se pueden modelar. Sin embargo, los modelos no hidrostáticos no pueden modelar todos los detalles de la rotura de las olas (como el arrastre de aire). Además, para fines de ingeniería costera no es necesario modelar detalladamente la rotura de las olas siempre que el efecto estadístico sobre, por ejemplo, la altura de la ola, sea correcto.

La disipación de energía de las olas rompientes en SWASH se tiene en cuenta al usar la similitud entre las olas de ruptura y los saltos hidráulicos, al garantizar que se conserven la masa y el momento. Sin embargo, esto solo es exacto cuando se utiliza una cantidad suficiente de capas verticales (10-20). Cuando la vertical es discretizada por solo unas pocas capas verticales (1-3), entonces las velocidades horizontales de las olas serán subestimadas, lo que resulta en una subestimación del inicio de la rotura de las olas [16]. Para tener en cuenta con precisión la disipación de energía debido a la rotura de las olas cuando se utiliza una resolución vertical aproximada, Smit et al. [16] introducen una aproximación frontal hidrostática (2013) que asume una presión hidrostática frente a la ola para iniciar la rotura de las olas. La presión hidrostática en SWASH se usa cuando la inclinación de la superficie local excede un valor preestablecido α [18]. Después de que ha pasado la cresta, el cálculo de presión no hidrostática se usa nuevamente.

Como se puede observar en la ecuación 3.4

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} > \alpha \sqrt{gd} \quad (3.4)$$

Para resolver la dispersión de frecuencia hasta un nivel aceptable de precisión, se aplica una aproximación del gradiente vertical de la presión no hidrostática junto con una malla de capas verticales empleando capas igualmente distribuidas. Este esquema recibe una buena dispersión lineal hasta $kd \approx 8$ y $kd \approx 16$ con dos y tres capas equidistantes, respectivamente, al 1 % de error en velocidad de fase de las ondas primarias (k y d son el número de onda y la profundidad, respectivamente). El modelo mejora su dispersión de frecuencia simplemente aumentando el número de capas verticales. Sería interesante aplicar una profundidad pequeña para no superar los límites de kd .

3.2.3 Condiciones de contorno

Los límites de la malla computacional creada pueden ser agua, tierra o playa, y pueden caracterizarse con las siguientes condiciones de contorno:

- Generadores de oleaje (regular, irregular unidireccional mediante un espectro 1D e irregular multidireccional mediante espectro 2D)
- Condiciones de contorno de absorción o generación
- Velocidad o descarga
- Invariantes de Riemann. Define $u \pm \sqrt{gh}$. Para flujos supercríticos o saltos hidráulicos
- Reflexión total en contornos cerrados o paredes
- Condición de radiación
- Esponjas que absorben energía
- Condiciones de contorno periódicas

Para el estudio del setup se han usado condiciones de generación del oleaje y de radiación . [18]

3.2.4 Relación con el modelo Boussinesq

SWASH no es un modelo de onda de tipo Boussinesq. De hecho, SWASH puede ejecutarse en ‘depthaveraged mode’ o modo de varias capas en el que el dominio computacional se divide en número fijo de capas verticales que siguen el terreno. SWASH mejora su dispersión de frecuencia aumentando este número de capas en lugar de aumentar el orden de los derivados de variables dependientes como modelos de onda de tipo Boussinesq. Sin embargo, contiene como mucho, derivadas espaciales de segundo orden, mientras que las aproximaciones de diferencias finitas aplicadas son como máximo de segundo orden en tiempo y espacio.

Además, SWASH no tiene ningún filtro numérico ni mecanismo de disipación dedicado para eliminar las inestabilidades de onda corta. Tampoco incluye otros dispositivos para medidas como el modelo de rodillo de superficie para romper olas, la técnica de ranura para mover costa, las funciones de fuente para la generación de onda interna y la alteración de la reglamentación ecuaciones para modelar la interacción onda-corriente. Como tal, SWASH es muy probable que sea competitivo con los modelos de onda de tipo Boussinesq extendidos en términos de robustez y el recurso computacional requerido para proporcionar resultados confiables del modelo en desafiantes

condiciones de onda y flujo. Por lo tanto, se puede ver como una alternativa atractiva a los modelos de onda de tipo Boussinesq [18].

3.3 Metodología de cálculo

3.3.1 Introducción

A lo largo de este apartado se va a mostrar el proceso que se ha seguido a lo largo del proyecto hasta la obtención de resultados. Se han estudiado diversos parámetros que establecen la configuración de una playa que podemos dividir en dos grandes bloques: **los parámetros de playa** y **los parámetros de oleaje**.

Los parámetros de playa que se han modificado son:

- Fricción de fondo, asociado al tamaño de grano o la vegetación de la zona, mediante una variación del número de Manning
- Valor de pendiente (o valor A en una playa en equilibrio dinámico)

Los parámetros de oleaje que se han modificado son:

- Altura de ola significativa en un espectro
- Periodo de onda en un espectro

Ambos parámetros se han ido modificando en tres configuraciones de playa distintas que son:

- Perfil de playa recto inclinado
- Perfil de playa en equilibrio dinámico
- Perfil de playa en equilibrio dinámico con barra

En los siguientes apartados se va a explicar cada uno de los valores usados en cada una de las configuraciones de playa y la justificación.

Se ha decidido calcular los valores de setup de cada uno de los casos tanto en no-hidroestático como en hidroestático para comprobar las diferencias que se producen en el cálculo y los errores que se comenten al calcularlo de una u otra forma.

Para cada caso se ha sacado valores como la velocidad media (en magnitud) o la altura de ola significativa para conocer la mecánica del mar en esta zona y observar el correcto funcionamiento del programa.

El dominio usado es una playa en formato reducido de 40 metros de longitud y unos 29 metros de zona sumergida con aproximadamente 11 metros de zona de tierra para poder estudiar el comportamiento de esta zona. El caso base que se ha establecido es $H_s = 0.2$ m, $T = 3$ s y $n = 0.027$.

3.3.2 Configuraciones de playas

Batimetría inclinada

La batimetría de esta configuración la describe la ecuación de una recta. Conocido el lugar de altura 0 y cambiando el talud, obtenemos numerosas pendientes que definen perfiles de playa. El talud base con el que se va a estudiar el setup de los diversos parámetros es $tg\beta = 0.025$

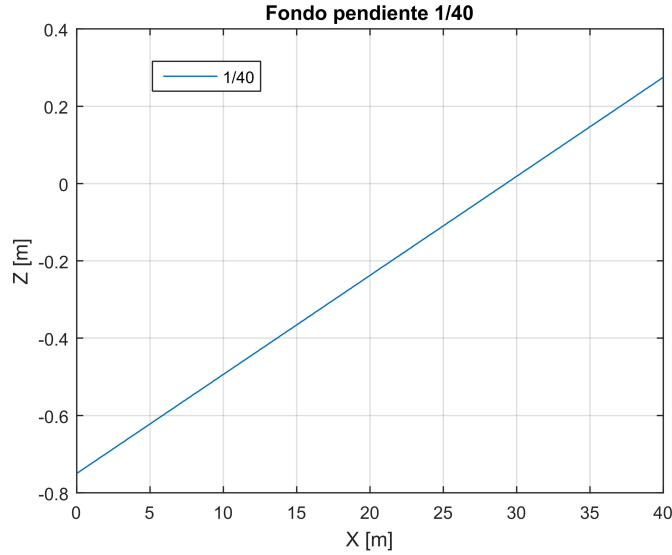


Figura 3.1 Fondo inclinado base. Talud 1/40 o $tg\beta = 0.025$.

Perfil en equilibrio dinámico

Este tipo de configuración de playa se define como el perfil que no se mueve ni cambia de forma apreciablemente en la sección transversal en un intervalo dado.

Este perfil soporta una cierta energía sin que se produzca modificación. Considerando profundidades reducidas la ecuación que define este tipo de perfil es 3.5

$$h(x) = \left(\frac{24}{5\rho g^{3/2} y^2} D_{cr} \right)^{2/3} x^{2/3} = Ax^{2/3} \quad (3.5)$$

El valor A se suele obtener mediante una expresión empírica:

$$A = 0.5\omega_s^{0.44} \quad (3.6)$$

Con:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{4(\rho_s - \rho)gD_{50}}{3\rho C_d}} \quad (3.7)$$

Como se puede observar la pendiente del perfil depende directamente del tamaño medio del sedimento. Como simplificación se ha creado una tabla de valores de A en función del tamaño medio del sedimento 3.2 [11].

d (mm)	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	0.063	0.0672	0.0714	0.0756	0.0798	0.084	0.0872	0.0904	0.0936	0.0968
0.2	0.100	0.103	0.106	0.109	0.112	0.115	0.117	0.119	0.121	0.123
0.3	0.125	0.127	0.129	0.131	0.133	0.135	0.137	0.139	0.141	0.143
0.4	0.145	0.1466	0.1482	0.1498	0.1514	0.153	0.1546	0.1562	0.1578	0.1594
0.5	0.161	0.1622	0.1634	0.1646	0.1658	0.167	0.1682	0.1694	0.1706	0.1718
0.6	0.173	0.1742	0.1754	0.1766	0.1778	0.179	0.1802	0.1814	0.1826	0.1838
0.7	0.185	0.1859	0.1868	0.1877	0.1886	0.1895	0.1904	0.1913	0.1922	0.1931
0.8	0.194	0.1948	0.1956	0.1964	0.1972	0.198	0.1988	0.1996	0.2004	0.2012
0.9	0.202	0.2028	0.2036	0.2044	0.2052	0.206	0.2068	0.2076	0.2084	0.2092
1.0	0.210	0.2108	0.2116	0.2124	0.2132	0.2140	0.2148	0.2156	0.2164	0.2172

Figura 3.2 Valores del parámetro A en función del tamaño de sedimento.

El caso base para esta configuración corresponde con un tamaño de sedimento $D_{50} = 0.43\text{mm}$ que se corresponde a un valor de $A = 0.1498$

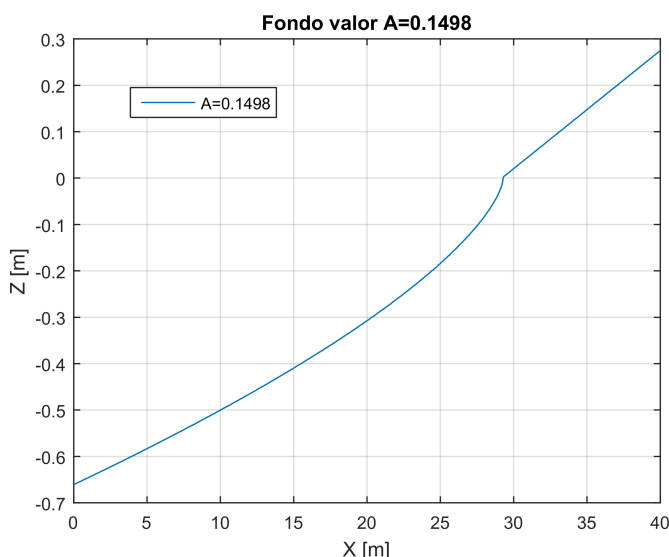


Figura 3.3 Perfil en equilibrio dinámico base. $A = 0.1498$.

Perfil en equilibrio dinámico con barra

Esta configuración de playa se ha obtenido introduciendo una barra en el perfil de equilibrio dinámico anterior.

Para establecer la forma, altura y situación de la barra se han tenido que definir varios factores que la caracterizan.

La ecuación que gobierna este fondo es 3.8:

$$d_s(x,y) = d(x,y) - \delta_0 \delta(x,y) \quad (3.8)$$

En el que:

- $d(x,y)$ es el fondo sin barra
- δ_0 es la proporción entre la altura de la costa y la profundidad no perturbada
- δ es la función que describe la barra

La función que describe la barra es 3.9 [12]:

$$\delta(x,y) = \exp\left(-\frac{\left(\frac{a'+b'}{2}\right)^2 \left[\left(\frac{x-x_0}{a'}\right)^2\right]}{2c^2}\right) \quad (3.9)$$

Siendo:

- a' y b' parámetros que definen la "distancia elíptica" al centro de la barra
- x_0 es la coordenada del centro de la barra
- c es un parámetro que define cómo de rápido cae la barra a medida que nos alejamos del centro de la barra

Al encontrarnos en un modelo 1D, la componente y no influye en la forma de la barra. El caso base corresponde a una configuración similar a la anterior con $A = 0.1498$ y una barra con los siguientes parámetros:

- $a' = 300$
- $x_0 = 20$ m
- $c = 1500$
- $\delta_0 = 0.1$

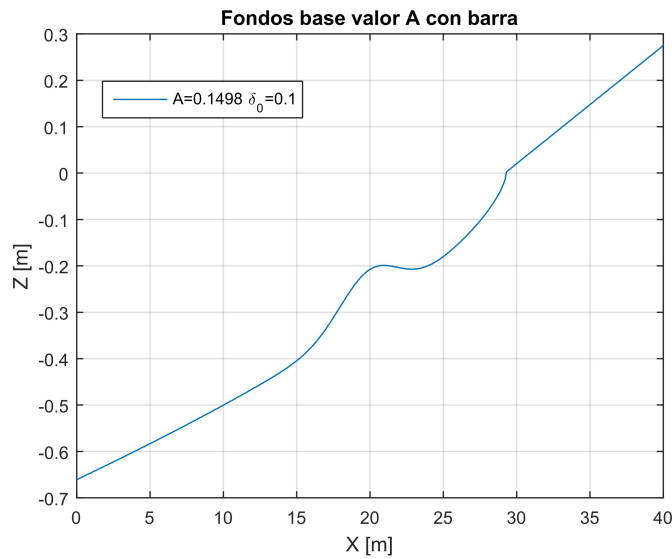


Figura 3.4 Perfil en equilibrio dinámico con barra base. $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$.

3.3.3 Variables analizadas

En esta sección se van a establecer los valores que se han usado para cada uno de los parámetros distintos de estudio. Conviene recordar que son:

- Altura de ola significativa
- Periodo de ola
- Fricción de fondo (mediante número de Manning)
- Características que definen cada batimetría
- Presencia de vegetación

Altura de ola significativa

Se ha modificando la altura de ola significativa sin variar ninguno de los demás parámetros del caso base. Siendo la altura de ola significativa espectral de 0.2 m, el rango de alturas que se ha usado va desde $H_0 = 0.1$ m a $H_0 = 0.5$ m. Se ha calculado tanto de modo hidrostático como en no-hidrostático. En el modo hidrostático, alturas de ola grandes ofrecen error en la ejecución del caso.

Periodo de ola

Se ha modificando el periodo sin variar ninguno de los demás parámetros del caso base. Siendo el periodo base de $T = 3$ s incluido en un espectro, el rango de periodos que se ha usado va desde $T = 1$ s a $T = 5$ s. Se ha calculado tanto de modo hidrostático como en no-hidrostático

Fricción de fondo

Se ha modificando el valor de la fricción de fondo sin variar ninguno de los demás parámetros del caso base. El valor de la fricción se ha dado en forma de número de Manning. El valor de n base es de 0.027 correspondiéndose a una playa de arena. El rango de valores usados va desde $n = 0.01$ que se correspondería a una playa de arena muy fina y uniforme, hasta $n = 0.05$ que se corresponde a una playa de arena muy gruesa o grava, con cierta rugosidad. Se ha calculado tanto de modo hidrostático como en no-hidrostático.

Característica de la batimetría usada

En este apartado se modifican los parámetros en cada una de las configuraciones de playa al ser diferente los elementos que caracterizan dicha configuración. Antes de establecer cada una de las configuraciones, es necesario mencionar que las dimensiones de la playa son en tamaño reducido, como si de un modelo experimental se tratase, para que se asemejen a los resultados obtenidos en el caso de realizarse el estudio en laboratorio. Aplicar un modelo reducido permite profundidades menores y una frecuencia de dispersión mejor.

En la configuración de playa recta e inclinada se ha variado la inclinación de la playa con taludes que oscilan entres un rango con una pendiente mínima de 1/50 hasta una pendiente máxima de 1/20, imagen 3.5.

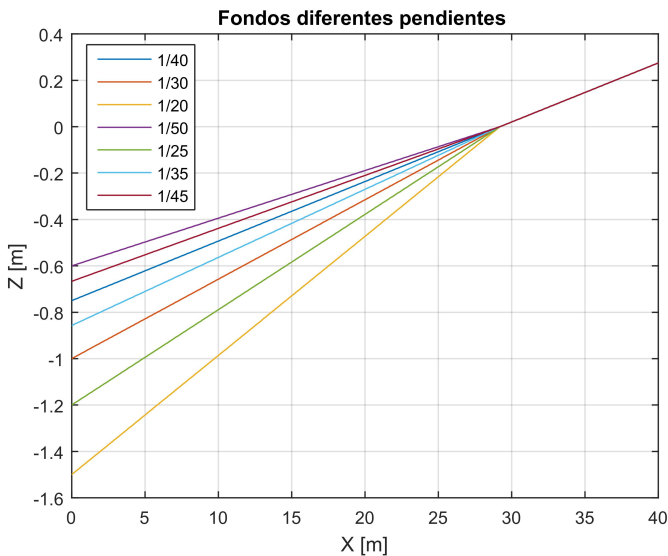


Figura 3.5 Perfiles inclinados con diferente talud usados.

En la configuración de la playa en equilibrio dinámico el elemento que se ha modificado es el valor A asociado directamente con un D_{50} . El rango de valores va desde $A = 0.1000$ a $A = 0.2100$, imagen 3.6.

Tabla 3.1 Valores de A y su D_{50} asociado.

Valor A	D50 (mm)
0.1000	0.20
0.1250	0.30
0.1390	0.37
0.1498	0.43
0.1790	0.65
0.1980	0.85
0.2100	1.00

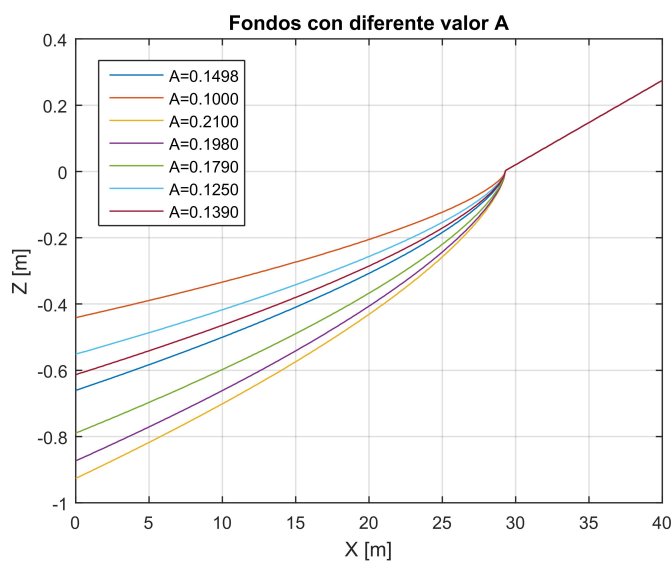


Figura 3.6 Perfiles en equilibrio dinámico con diferente valores de A usadas.

En la configuración de la playa en equilibrio dinámico con barra se han modificado dos elementos, ofreciendo diferentes configuraciones de playa. Un elemento es el valor A asociado directamente con un D_{50} y el rango de valores va desde $A = 0.1000$ a $A = 0.2100$, dejando el valor $\delta_0 = 0.1$ constante, imagen 3.7. El otro elemento que se ha modificado es el factor de la barra, es decir, la altura de la barra. El factor de barra va desde $\delta_0 = 0.05$ a $\delta_0 = 0.25$, dejando el valor de $A = 0.1498$ constante, imagen 3.8.

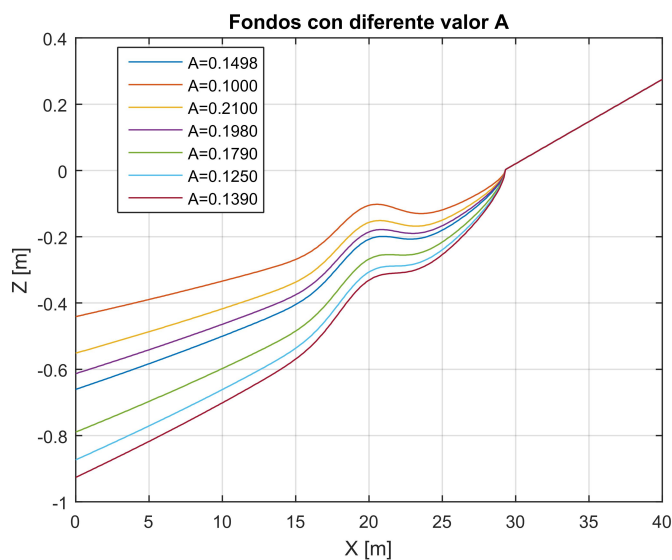


Figura 3.7 Perfiles en equilibrio dinámico con barra con diferente valores de A usadas. $\delta_0 = 0.1$.

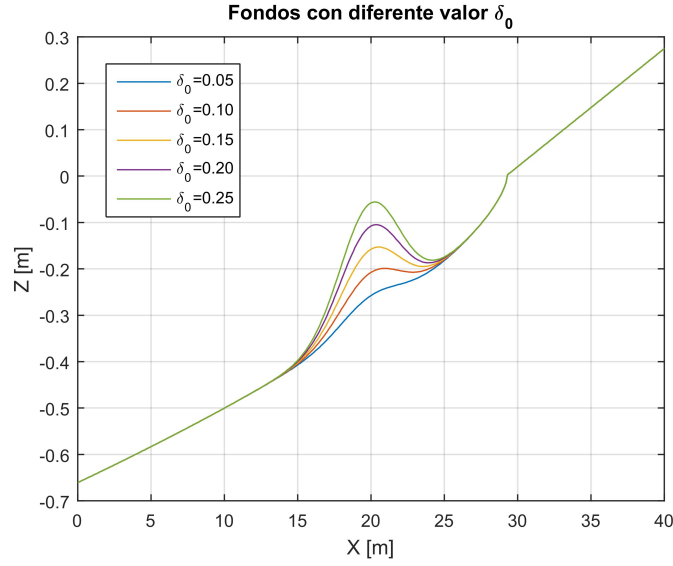


Figura 3.8 Perfiles en equilibrio dinámico con barra con diferente valores de δ_0 usados. $A = 0.1498$.

Para todas la configuraciones se ha decidido implantar el mismo fondo en la parte no sumergida. En este caso se ha decidido que sea recta con un talud $1/40$ o $\tan \beta = 0.025$, bastante usado en los modelos experimentales.

Presencia de vegetación

Se ha estudiado la presencia de vegetación únicamente en el perfil de equilibrio dinámico con barra al ser el más común de las configuraciones estudiadas. Las variables que se han modificado sobre la vegetación son la altura y la cantidad de plantas por metro lineal.

El tipo de planta usada es la *Typha latifolia* que tiene un diámetro de 1 cm y una densidad aproximadamente de 40 plantas por metro cuadrado. En los resultados se mostrarán la evolución del setup con la variación de ambas variables, además de cómo influye la presencia de plantas en el setup, la H_{sig} y la velocidad [14].

Se ha variado la número de planta entre los valores de 0 y 20 plantas (algo menor que su densidad normal) y los valores de altura de planta desde 0.05m a 0.25m. Al encontrarnos en un modelo a escala reducida, las alturas no pueden ser muy grandes (valor máximo de altura es un 33 % del fondo total).

El caso base correspondería a 10 plantas por metro lineal con una altura de 0.1m

3.3.4 Casos estudiados

Los casos que se han estudiado con este tipo de perfil son los que se muestran en la siguiente tabla. Se ha partido del caso base y se han ido modificando los parámetros uno a uno dentro de su rango establecido.

En todos los casos se ha establecido el valor de altura de ola, el periodo, las características del perfil y la fricción. Además, se ha comprobado que en todos los casos nos encontramos en aguas someras. Comprobar esto es algo bastante importante dadas las limitaciones del programa

mencionadas anteriormente.

Se mostrarán tres tablas, cada una referida a un tipo de configuración de playa. En el análisis de resultados se separarán también en estas tres configuraciones de manera independientes, aunque posteriormente se compararán resultados obtenidos entre configuraciones distintas.

Cada uno de los casos ha sido ejecutado tanto en hidrostático como en no-hidrostático, por lo que el número de casos ejecutados se convierte en el doble. Se han ejecutado un total de 117 casos en ambos modos, lo que hace un total de 234 casos. Cada caso ha tenido una duración de 10 min de ejecución (el modo hidrostático algo menos por menor coste computacional).

En la mayoría de los parámetros se han ejecutado los mismo valores para las tres configuraciones, a excepción de los parámetros que definen el perfil (son diferentes según el tipo de perfil) y la altura de ola. A pesar de ser valores similares, en alguna configuración ha sido necesario obtener bastantes más valores de setup en función de la altura de ola para poder establecer el comportamiento con la variación de dicho parámetro.

Tabla 3.2 Casos estudiados con perfil inclinado.

Caso	H (m)	T (s)	tg B	kd	n
C112	0.2	1	1/40	3.0323	0.027
C127	0.2	1.25	1/40	2.0033	0.027
C124	0.2	1.5	1/40	1.4862	0.027
C128	0.2	1.75	1/40	1.1876	0.027
C125	0.2	2	1/40	0.994	0.027
C129	0.2	2.5	1/40	0.756	0.027
C107	0.2	3	1/40	0.6135	0.027
C130	0.2	3.5	1/40	0.5177	0.027
C126	0.2	4	1/40	0.4485	0.027
C131	0.2	4.5	1/40	0.3959	0.027
C111	0.2	5	1/40	0.3546	0.027
C110	0.1	3	1/40	0.6135	0.027
C120	0.12	3	1/40	0.6135	0.027
C119	0.15	3	1/40	0.6135	0.027
C121	0.18	3	1/40	0.6135	0.027
C107	0.2	3	1/40	0.6135	0.027
C123	0.25	3	1/40	0.6135	0.027
C109	0.3	3	1/40	0.6135	0.027
C122	0.4	3	1/40	0.6135	0.027
C108	0.5	3	1/40	0.6135	0.027
N_0_01	0.2	3	1/40	0.6135	0.01
N_0_02	0.2	3	1/40	0.6135	0.02
N_0_025	0.2	3	1/40	0.6135	0.025
C107	0.2	3	1/40	0.6135	0.027
N_0_033	0.2	3	1/40	0.6135	0.033
N_0_04	0.2	3	1/40	0.6135	0.04
N_0_05	0.2	3	1/40	0.6135	0.05
C1_20	0.2	3	1/20	0.9225	0.027
C1_25	0.2	3	1/25	0.8084	0.027
C1_30	0.2	3	1/30	0.7228	0.027
C1_35	0.2	3	1/35	0.6615	0.027
C107	0.2	3	1/40	0.6135	0.027
C1_45	0.2	3	1/45	0.5746	0.027
C1_50	0.2	3	1/50	0.5423	0.027

Tabla 3.3 Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico.

Caso	H (m)	T (s)	Valor A	kd	n
C205	0.200	1.000	0.1498	2.7132	0.027
C229	0.200	1.250	0.1498	1.815	0.027
C226	0.200	1.500	0.1498	1.3629	0.027
C232	0.200	1.750	0.1498	1.098	0.027
C227	0.200	2.000	0.1498	0.9239	0.027
C228	0.200	2.500	0.1498	0.7069	0.027
C201	0.200	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C230	0.200	3.500	0.1498	0.4864	0.027
C231	0.200	4.000	0.1498	0.4218	0.027
C233	0.200	4.500	0.1498	0.3727	0.027
C204	0.200	5.000	0.1498	0.334	0.027
C203	0.100	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C219	0.120	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C220	0.150	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C225	0.160	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C224	0.170	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C221	0.180	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C201	0.200	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C222	0.250	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C223	0.300	3.000	0.1498	0.5719	0.027
C202	0.400	3.000	0.1498	0.5719	0.027
N_0_01	0.2	3	0.1498	0.5719	0.01
N_0_02	0.2	3	0.1498	0.5719	0.02
N_0_025	0.2	3	0.1498	0.5719	0.025
N_0_027	0.2	3	0.1498	0.5719	0.027
N_0_033	0.2	3	0.1498	0.5719	0.033
N_0_04	0.2	3	0.1498	0.5719	0.04
N_0_05	0.2	3	0.1498	0.5719	0.05
A_01000	0.2	3	0.1	0.4593	0.027
A_01250	0.2	3	0.125	0.5179	0.027
A_01390	0.2	3	0.139	0.5488	0.027
A_01498	0.2	3	0.1498	0.5719	0.027
A_01790	0.2	3	0.179	0.6315	0.027
A_01980	0.2	3	0.198	0.6687	0.027
A_02100	0.2	3	0.21	0.7001	0.027

Tabla 3.4 Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico con barra.

Caso	H (m)	T (s)	Perfil			kd	n
			Valor A	Localización barra (m)	δ_0		
C331	0.2	1	0.1498	20	0.1	2.6843	0.027
C339	0.2	1.25	0.1498	20	0.1	1.798	0.027
C332	0.2	1.5	0.1498	20	0.1	1.3517	0.027
C338	0.2	1.75	0.1498	20	0.1	1.0898	0.027
C333	0.2	2	0.1498	20	0.1	0.9174	0.027
C334	0.2	2.5	0.1498	20	0.1	0.7023	0.027
C313	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C335	0.2	3.5	0.1498	20	0.1	0.4835	0.027
C336	0.2	4	0.1498	20	0.1	0.4193	0.027
C340	0.2	4.5	0.1498	20	0.1	0.3705	0.027
C337	0.2	5	0.1498	20	0.1	0.332	0.027
C315	0.1	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C325	0.12	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C330	0.14	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C326	0.15	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C327	0.18	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C313	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C328	0.25	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C329	0.3	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
C314	0.4	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
N_0_01	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.01
N_0_02	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.02
N_0_025	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.025
N_0_027	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
N_0_033	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.033
N_0_04	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.04

Tabla 3.5 Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico con barra (cont.).

Caso	H (m)	T (s)	Perfil			kd	n
			Valor A	Localización barra (m)	δ_0		
N_0_05	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.05
A_01000	0.2	3	0.1000	20	0.1	0.4593	0.027
A_01250	0.2	3	0.1250	20	0.1	0.5179	0.027
A_01390	0.2	3	0.1390	20	0.1	0.5488	0.027
A_01498	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
A_01790	0.2	3	0.1790	20	0.1	0.6315	0.027
A_01980	0.2	3	0.1980	20	0.1	0.6687	0.027
A_02100	0.2	3	0.2100	20	0.1	0.7001	0.027
FAC_005	0.2	3	0.1498	20	0.05	0.5719	0.027
FAC_-010	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027
FAC_015	0.2	3	0.1498	20	0.15	0.5719	0.027
FAC_020	0.2	3	0.1498	20	0.2	0.5719	0.027
FAC_025	0.2	3	0.1498	20	0.25	0.5719	0.027

Tabla 3.6 Casos estudiados sobre la presencia de vegetación con perfil en equilibrio dinámico con barra.

Caso	H (m)	T (s)	Perfil			kd	n	Plantas por m	Altura plant. (m)
			Valor A	Localización barra (m)	Factor barra				
C313	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	0	0
1plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	1	0.1
5plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	5	0.1
10plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.1
15plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	15	0.1
20plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	20	0.1
10plant_05	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.05
10plant	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.1
10plant_15	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.15
10plant_20	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.2
10plant_25	0.2	3	0.1498	20	0.1	0.5719	0.027	10	0.25

3.3.5 Comentarios sobre los resultados obtenidos

Para cada uno de los casos ejecutados tanto en modo hidrostático como en modo no-hidrostático, se han obtenido los siguientes valores:

- Fondo del perfil
- Punto o puntos de rotura (puntos en los que se cumple el parámetro de rotura). Solo en el modo no-hidroestático
- Runup alcanzado en ambos modos
- Altura de ola significativa en todo el dominio
- Velocidad (en magnitud) en cada uno de los puntos del dominio
- Valor del setup en cada uno de los puntos del dominio

Una vez conocidos estos datos de cada uno de los casos de cada configuración y para conocer el comportamiento del setup en función de la variación del parámetro que se está modificando, se ha extraído el valor del setup máximo y en un punto concreto del dominio en cada caso. Todos los valores de setup debidos a la variación de un parámetros se han puesto en una gráfica para ser comparados y se han adimensionalizado con respecto a la altura de ola significativa usada en cada caso.

$$\eta^* = \frac{\eta(m)}{H_0(m)} \quad (3.10)$$

Se tienen gráficas para cada uno de los parámetros de cada configuración del valor del setup máximo y en un punto fijo establecido y sus respectivos valores adimensionales. La discretización del dominio se ha realizado cada 0.25 metros por lo que si el valor máximo se encuentra en la mitad entre un elemento de la malla u otro, se desconoce si el valor obtenido es el máximo real o no. Para evitar la influencia de la parte no sumergida y errores en la discretización se ha decidido comparar los resultados en un punto fijo, cercano a la interfase entre agua y tierra (cota 0) para poder obtener el mayor numero de resultados posibles. El lugar donde se va a realizar la comparación va a ser en la posición $x = 30.5$ m. La parte no mojada se ha decidido que sea similar en las distintas configuraciones para que esta parte no influya en la comparación.

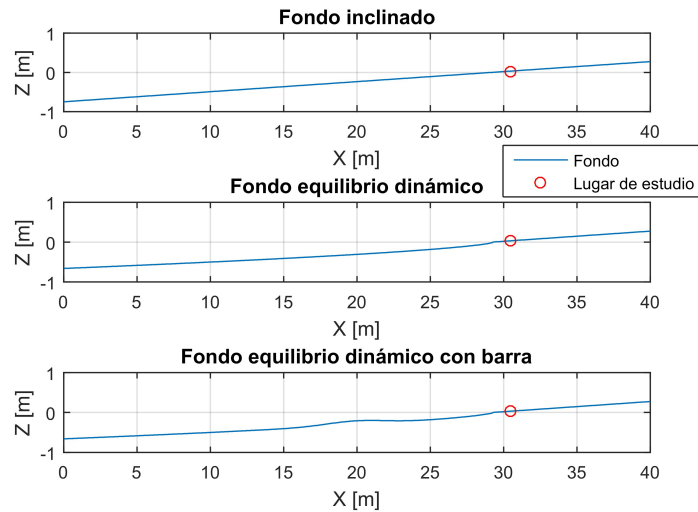


Figura 3.9 Lugar de estudio del setup en las diferentes configuraciones de playa.

Una vez obtenido el comportamiento del setup debido a cada parámetro, se mostrarán en conjunto en una gráfica junto con su correspondiente recta de ajuste para conocer la ecuación que define

dicho comportamiento y que influencia tiene cada uno sobre el setup de la playa.

Finalmente, compararemos los resultados obtenidos del setup con las distintas formulaciones empíricas y con la fórmula basada en la teoría lineal de ondas para comprobar la veracidad y la diferencia en los resultados. La comparación de resultados se hará respecto al valor del setup máximo.

4 Resultados

4.1 Introducción

En este capítulo se van a mostrar los resultados más representativos obtenidos de cada uno de los casos, así como la influencia de cada uno de los parámetros en el setup y comparación de éstos entre si.

Después de cada comparación de los diferentes parámetros, se incluirá una conclusión en la que se decidirá cuales son los más influyentes. Para ello, usaremos una gráfica que nos permita comparar cada uno de los parámetros con el resto , y una tabla que nos ayude a ver la importancia de cada uno de ellos.

Finalmente, incluiremos una comparación entre los resultados obtenidos con las formulaciones expuestas en la sección 2.4 para concluir si se parecen o difieren, y el error que se comete.

4.2 Perfil inclinado

4.2.1 Caso base

Como se ha establecido en el capítulo anterior, el caso base en esta configuración de playa es el siguiente:

- $H_0 = 0.2$ m
- $T = 3$ s
- $n = 0.027$
- Talud = 1/40 o $tg\beta = 0.025$

En las imágenes 4.1 y 4.2 se muestran las principales diferencias entre el modo hidrostático y el no-hidrostático. Se observa una diferencias entre ambos modos en la localizacion del runup y la H_{sig} al no tenerse en cuenta las componentes no hidrostáticas en el dominio. El setup también difiere entre ambos modos (inexistencia de setdown en el modo no-hidrostático) y en la velocidad en la zona de rotura del oleaje. Se observa un pico de velocidad que desciende rápidamente hasta 0

en el punto de interfase agua-tierra. Además, el pico de velocidad coincide con el punto en el que se observa un mayor gradiente en el setup, dentro de la zona de rompientes.

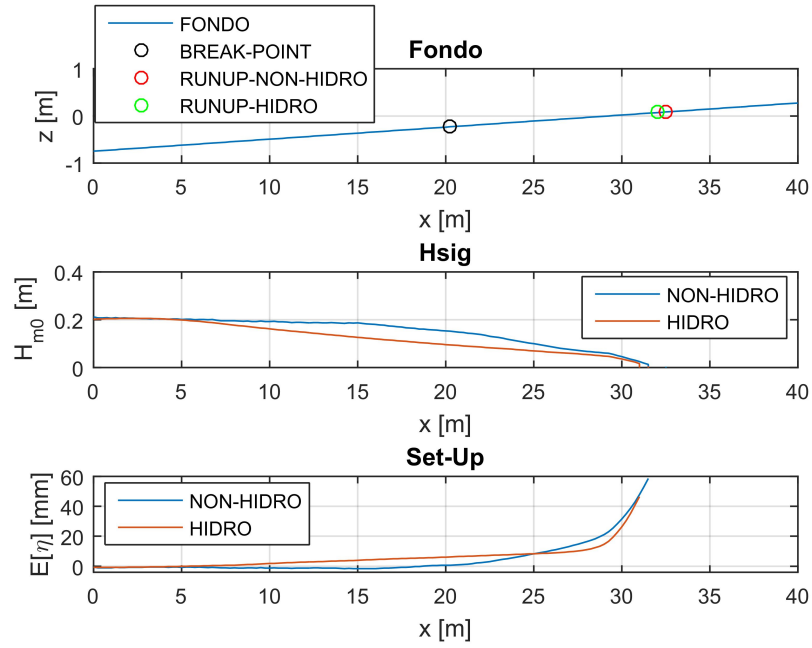


Figura 4.1 Perfil, punto de rotura, runup, setup, y Hsig del caso base del perfil inclinado.

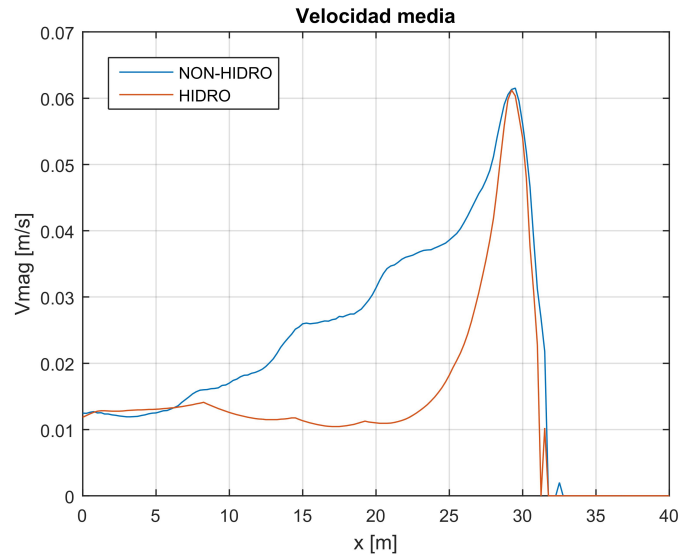


Figura 4.2 Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil inclinado.

El comportamiento de setup, velocidad, y H_{sig} parece más realista en el modo no-hidrostático ya que, por ejemplo, el setup describe la ecuación 2.14 expuesta en el capítulo 2.

4.2.2 Variación de altura de ola

Se ha variado la altura de ola en el rango y los valores establecidos en el Capítulo 3 obteniendo los valores de setup en $x = 30.5$ m, con el resultado que se muestra en la figura 4.3.

En la imagen 4.3 el setup es mayor con el aumento de la altura de ola, con tendencia prácticamente lineal. Sin embargo, al adimensionalizar respecto a la altura de ola aparece una curva totalmente diferente. Los valores adimensionales de setup son mayores a menor altura de ola a pesar de que el setup es menor. Esto se debe a la adimensionalización expuesta en la ecuación 3.10. A pesar de tener una altura de ola mayor y un setup mayor, la variación no es proporcional por lo que la curva desciende cuadráticamente hasta parecer estabilizarse.

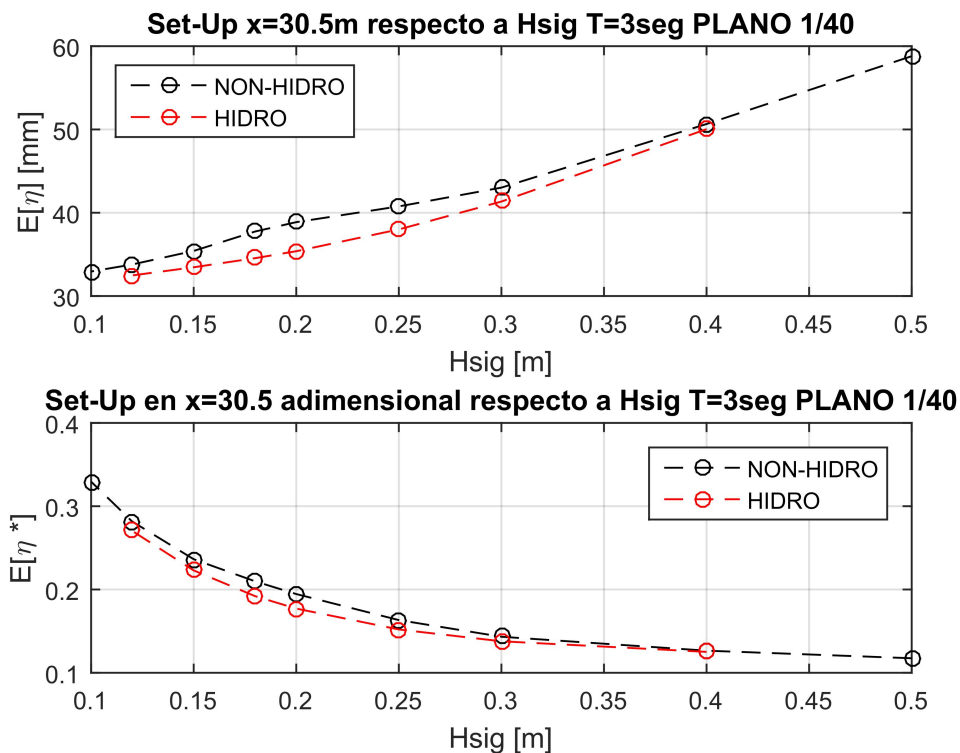


Figura 4.3 Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5$ m. Fondo inclinado 1/40.

4.2.3 Variación del periodo

Para comparar el periodo, se han dejado todos los parámetros con los valores establecidos en el caso base, y se ha ido variando el periodo entre el rango establecido en el metodología. Se han obtenido resultados en el punto establecido para su comparación.

El valor del setup en la imagen 4.4 varía mucho entre el modo hidrostático y no-hidrostático en pequeños periodos y parece que la diferencia se estabiliza en periodos mayores. Las gráficas de comparación del setup y del setup adimensional tienen la misma tendencia ya que cada valor se ha adimensionalizado con respecto a su altura de ola, que en este caso es la misma ($H_0 = 0.2$ m). Se observa una oscilación en la parte de periodos mayores, pero gracias a la gráfica adimensional podemos ver que esa oscilación no supera el 1 % del setup adimensionalizado.

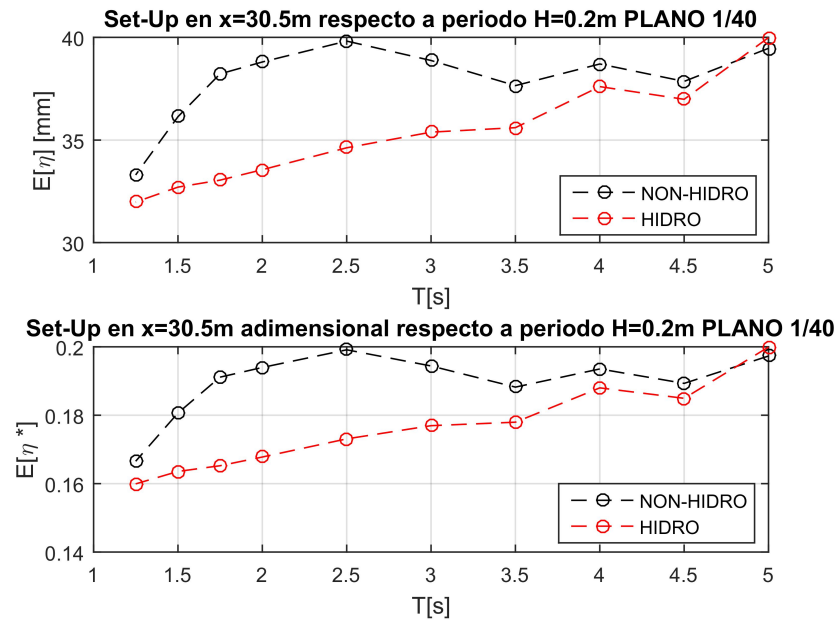


Figura 4.4 Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5 m$. Fondo inclinado 1/40.

4.2.4 Variación de la fricción de fondo

En este caso, se produce un menor setup con un aumento de la fricción de fondo como parece lógico. Se observa que con poca fricción las variaciones de setup son pequeñas pero con mayor fricción, estas variaciones son mayores. Los rangos de valores usados y lo que significa cada uno de los valores en la playa se explica en el capítulo 3.

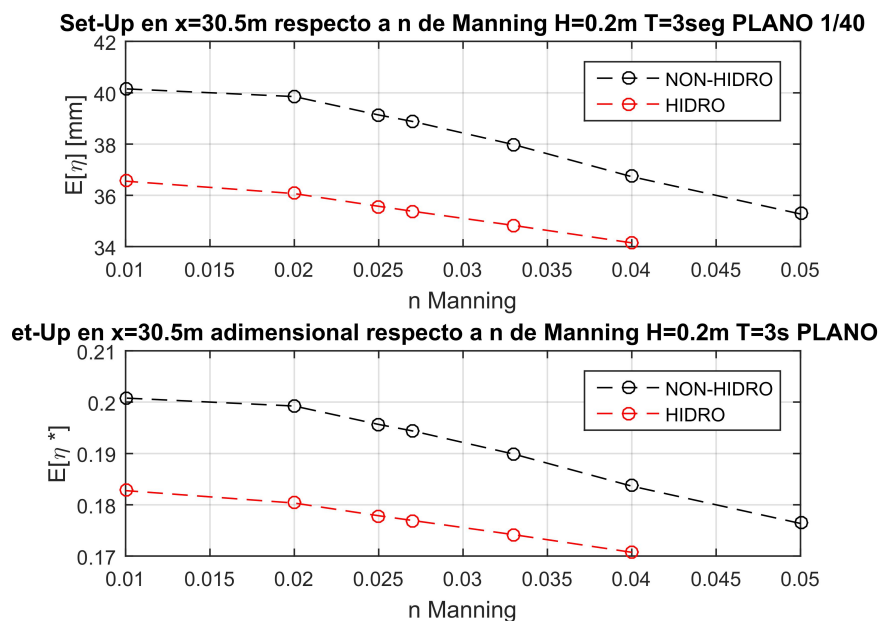


Figura 4.5 Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5m$. Fondo inclinado 1/40.

4.2.5 Variación de la pendiente del fondo

En este caso se observa la tendencia lineal en la variación del setup variando la pendiente. Una pendiente menor, disipa menos la energía, por lo que el setup es mayor. Se observa también que ambos modos no son paralelos sino que a medida que aumentamos el talud, la diferencia entre ambos va aumentando. En un fondo inclinado es más notable la diferencia entre ambos modos dado que las componentes no hidrostáticas en este tramo se hacen más importantes.

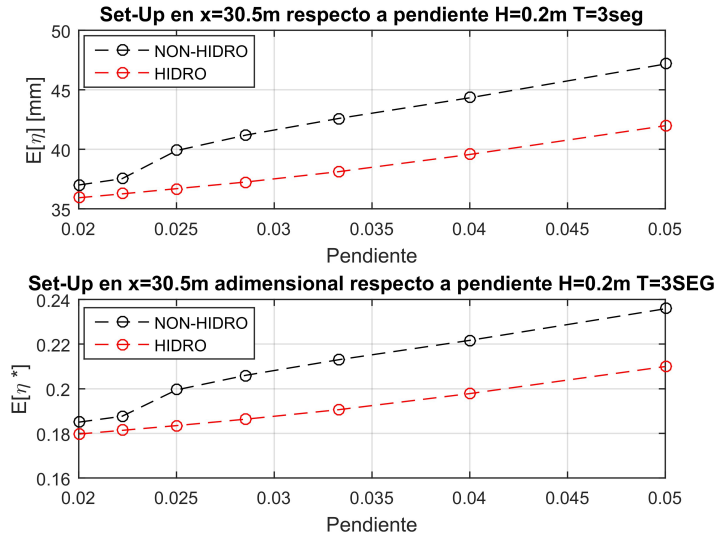


Figura 4.6 Variación del setup respecto a la pendiente del fondo en $x = 30.5m$. Fondos inclinados.

4.2.6 Comparación de todos los parámetros

Se ha visto la influencia en el setup de cada uno de los parámetros que influyen por separado. En este apartado, se incluirán en una misma gráfica 4.7 todos estos parámetros para poder compararlo y se ajustará una fórmula que describa la relación que existe de cada parámetro con el setup adimensional. Finalmente se sacarán conclusiones sobre los resultados.

Las ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 describen cada uno de los ajustes realizados. La ecuación de arriba se corresponde a la línea continua, en régimen no-hidrostático, y ecuación de abajo, que se corresponde a la línea discontinua, en régimen hidrostático.

$$\text{Periodos: } y = \begin{cases} 0.004701x^3 - 0.04754x^2 + 0.1508x + 0.04493 & R^2 = 0.9321 \\ 0.00108x^3 - 0.009567x^2 + 0.03469x + 0.1289 & R^2 = 0.9649 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\text{Alturas: } y = \begin{cases} 0.6229e^{-12.64x} + 0.1613e^{-0.6674x} & R^2 = 0.9986 \\ 0.6989e^{-13.72x} + 0.1421e^{-0.3772x} & R^2 = 1 \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\text{Números de Manning: } y = \begin{cases} -9.439x^2 - 0.08097x + 0.2033 & R^2 = 0.9893 \\ -5.417x^2 - 0.1385x + 0.1848 & R^2 = 0.9965 \end{cases} \quad (4.3)$$

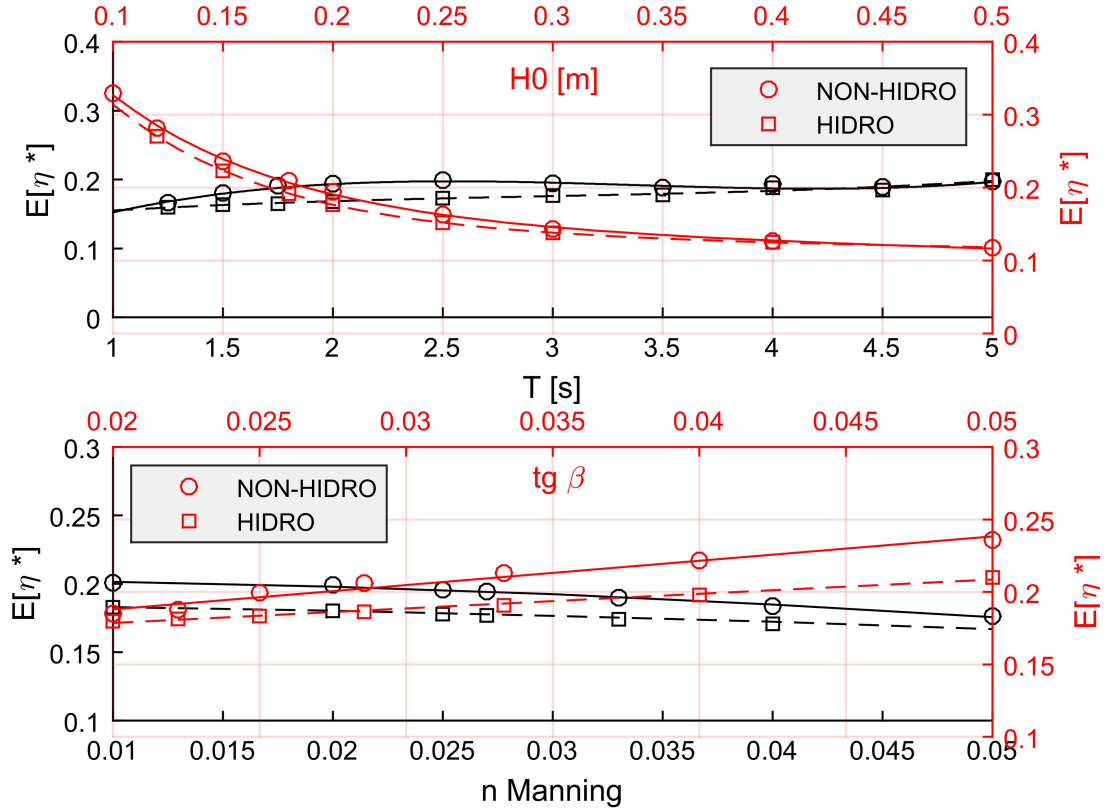


Figura 4.7 Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5m$. Fondo inclinado. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor $tg \beta$ (en rojo).

$$tg \beta: y = \begin{cases} 1.679x + 0.1544 & R^2 = 0.9695 \\ 1.002x + 0.1585 & R^2 = 0.9912 \end{cases} \quad (4.4)$$

Una vez mostradas las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del setup en función de los distintos parámetros y con ayuda de la tabla 4.1, podemos sacar ciertas conclusiones.

Es evidente que no todos los parámetros afectan de igual manera al setup. Distinguir qué parámetros es necesario modificar para conseguir una mayor variación de setup es algo complejo, ya que, como se puede observar, la mayor variación de ciertos parámetros solo se produce en ciertos rangos, y además, hay algunos muy difíciles de modificar.

Si observamos la variación de setup con respecto a la modificación del periodo, se puede concluir que con periodos pequeños, la variación de setup es bastante mayor que en periodos grandes. Aumentar el periodo 4 veces implica un aumento del setup en torno al 20%. La variación de setup adimensional con respecto a la altura de ola es bastante significativa. Para un rango de alturas grandes se ve algo reducido esta variación de setup, pero no deja de ser significativa. El número de Manning es, en principio, uno de los parámetros que menos variación del setup provoca. Un aumento de 5 veces la fricción de fondo genera un descenso de solo el 12% del setup. La pendiente es uno de los parámetros más influyentes en la variación del setup. Una pendiente mayor, evita un setup mayor.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo inclinado.

Párametro		Valor mínimo	η^* mínimo	η^* base	Valor máximo	η^* máximo	Diferencia η^*	Incremento (%)
T (s)	NH	1.25	0.1665	0.1944	5	0.1974	0.0309	18.56
	H	1.25	0.1599	0.1769	5	0.1999	0.0400	25.02
H0 (m)	NH	0.1	0.3294	0.1944	0.5	0.1176	-0.2118	-64.30
	H	0.12	0.2706	0.1769	0.4	0.1252	-0.1454	-53.73
n	NH	0.01	0.2008	0.1944	0.05	0.1764	-0.0244	-12.15
	H	0.01	0.1827	0.1769	0.04	0.1707	-0.0120	-6.57
P	NH	0.02	0.1851	0.1944	0.05	0.2359	0.0508	27.44
	H	0.02	0.1757	0.1769	0.05	0.2099	0.0342	19.46

Conocida la influencia de cada parámetro en la variación del setup podemos sacar varias conclusiones:

- La pendiente es uno de los parámetros más influyentes en la variación del setup, pero su modificación en una playa se antoja bastante difícil y costosa.
- A pesar de que una modificación en la fricción de fondo provoque poca variación en el setup, parece ser uno de los parámetros mas fáciles y baratos de modificar.
- La altura de ola es uno de los parámetros que, a pesar de disminuir el valor del setup adimensional, más setup genera en una playa, por lo que una modificación en la altura de ola supondría un descenso significativo del setup.
- Tanto periodo como altura de ola en el contorno son parámetros difíciles de controlar, ya que dependen de la meteorología y de la situación del mar.

4.3 Perfil en equilibrio dinámico

4.3.1 Caso base

Como se ha establecido en el capítulo anterior, el caso base en esta configuración de playa es el siguiente:

- $H_0 = 0.2\text{m}$
- $T = 3\text{s}$
- $n = 0.027$
- $A = 0.1498$

Se ha ejecutado el caso base y se han obtenido todos los valores necesarios para la compresión del funcionamiento de la rotura del oleaje. Al tratarse de fondo diferente, que tiene una pendiente menor que el caso con fondo inclinado en la parte más profunda pero que acaba con una pendiente algo mayor en la zona cercana a la cota 0, hace indicar que los valores de velocidad y setup van a ser mayores debido a que un cambio mas brusco disipa algo menos la energía del oleaje.

En las imágenes 4.8 y 4.9 se pueden observar varios detalles. Por un lado la diferencia de nuevo entre el modo hidrostático y el modo no hidrostático es bastante clara, sobre todo en la zona de rotura en adelante. Por otro lado, como se había supuesto, hay un mayor setup y velocidad en la zona cercana a la parte emergida. La H_{sig} también se ve influido por esto, que se mantiene en 0.2 m y luego baja rápidamente.

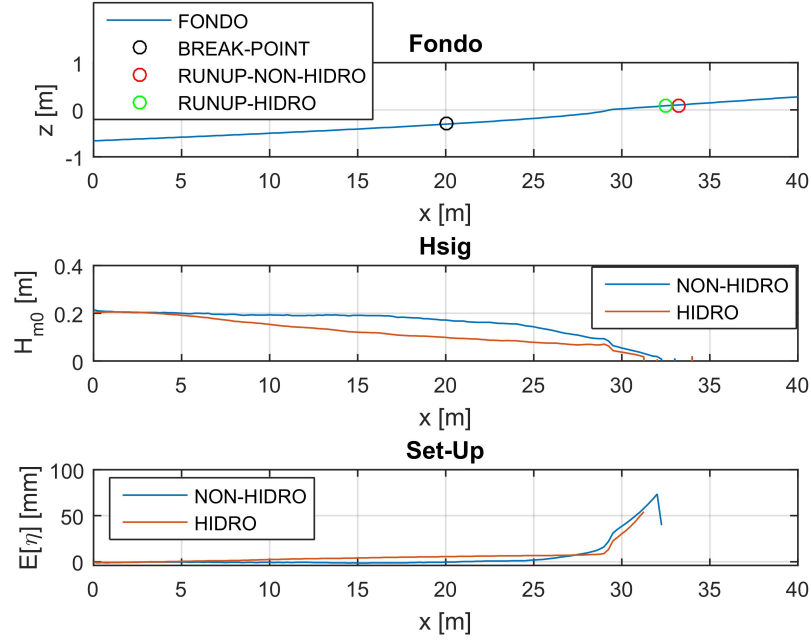


Figura 4.8 Perfil, punto de rotura, runup, setup, y H_{sig} del caso base del perfil en equilibrio dinámico.

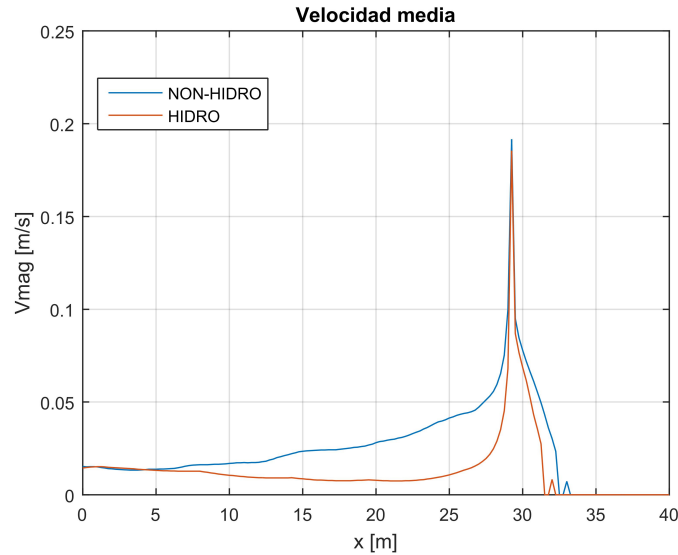


Figura 4.9 Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil en equilibrio dinámico.

4.3.2 Variación de altura de ola

Se observa en la imagen 4.10 que, aunque se tengan diferentes valores de setup que en la batimetría anterior, la tendencia lineal en la primera gráfica y exponencial en la segunda es muy similar. Ese descenso del setup adimensional causado por el aumento de la altura de ola es más pronunciado para valores pequeños de altura de ola que para valores grandes.

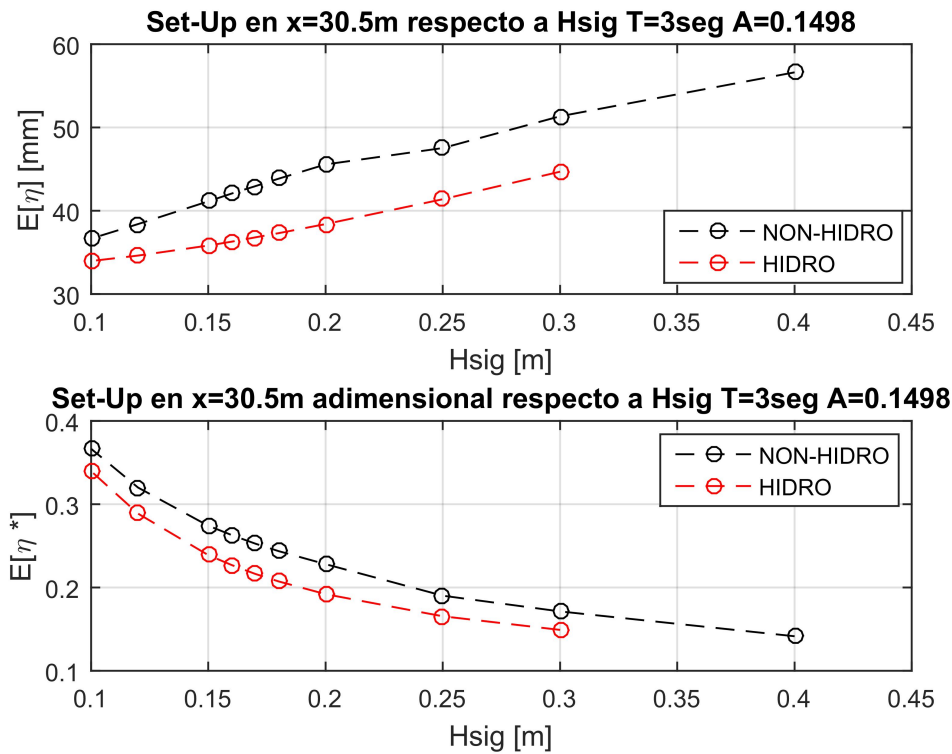


Figura 4.10 Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$.

4.3.3 Variación del periodo

Para esta configuración se ha variado el periodo en el rango de valores expuestos en la metodología y se han obtenido los siguientes resultados en la imagen 4.11 .

De nuevo, se observa la misma tendencia que en la configuración anterior. Una variación de periodo en los valores más bajos estudiados provoca una variación de setup mayor que en los valores mas grandes de periodo estudiados.

La tendencia a un valor casi constante entre los periodos mayores, nos revela que el periodo prácticamente solo influye para valores bajos, ya que una variación de periodo en valores altos no supone variación ninguna. La oscilación que se produce apenas supone una variación del 1 %.

También se observa una diferencia bastante mayor en periodos pequeños que en periodos altos entre ambos modos. Comienzan con una diferencia aceptables, que va en aumento y después disminuye hasta tener valores de setup prácticamente iguales.

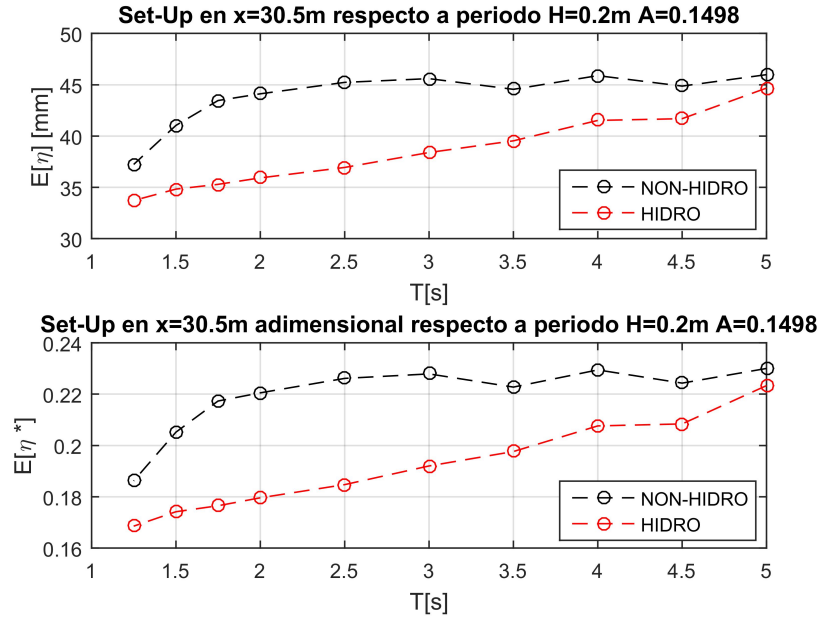


Figura 4.11 Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$.

4.3.4 Variación de la fricción de fondo

Se puede observar en la imagen 4.12 a tendencia que describe este parámetro tanto en esta configuración como en la anterior, a excepción de igualdad en los valores, es la misma: una mayor variación de setup para coeficientes de fricción mayores.

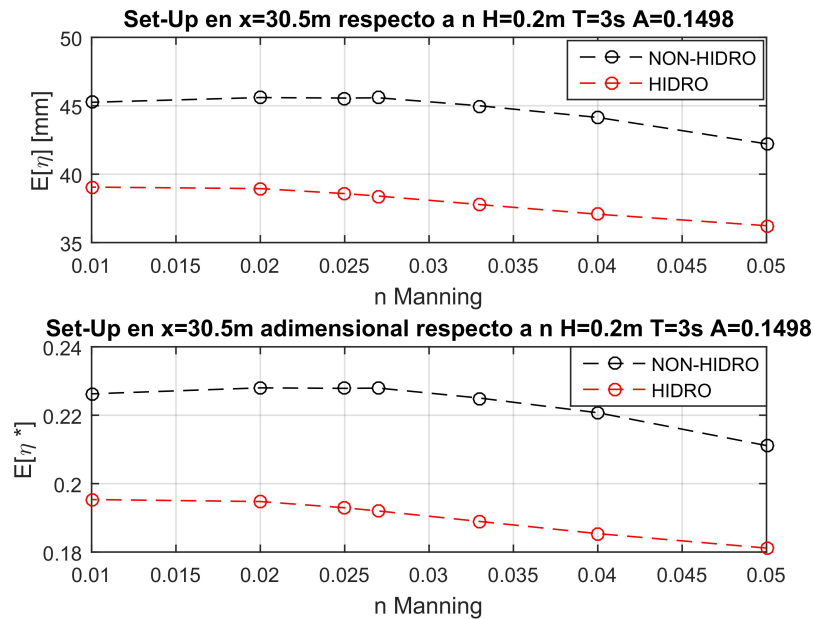


Figura 4.12 Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$.

4.3.5 Variación del valor A

La variación de este parámetro provoca cierta tendencia lineal en el setup de la playa. La diferencia que se observa en la imagen 4.13 es la separación entre el modo hidrostático y no-hidrostático a medida que el valor A aumenta, o lo que es lo mismo, el D_{50} de las partículas que componen el fondo aumenta.

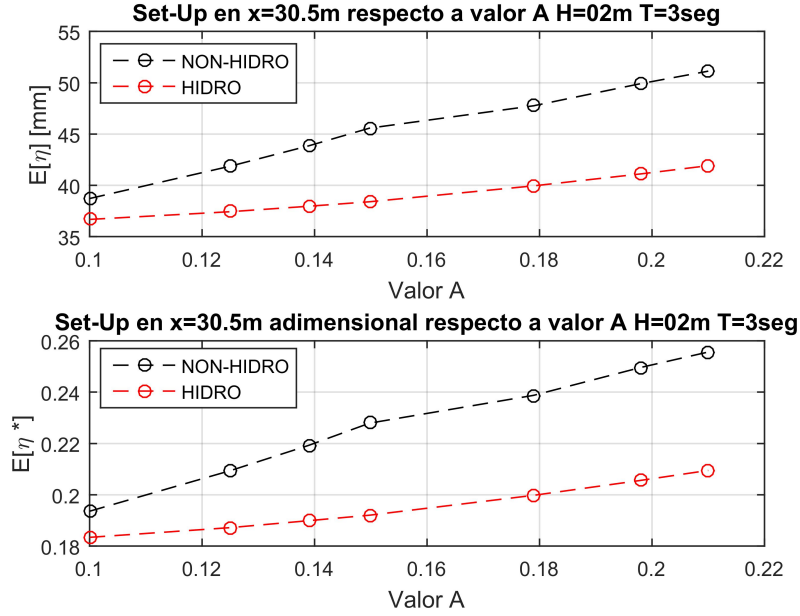


Figura 4.13 Variación del setup respecto al valor A en $x = 30.5m$. Fondos en equilibrio dinámico.

4.3.6 Comparación de todos los parámetros

Para finalizar con el estudio de los parámetros que influyen en el setup de esta configuración, es necesario comparar los resultados obtenidos entre ellos para obtener el más influyente y poder obtener ciertas conclusiones.

Las ecuaciones 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 describen cada uno de los ajustes realizados. La ecuación de arriba se corresponde a la línea continua, en régimen no-hidrostático, y ecuación de abajo, que se corresponde a la línea discontinua, en régimen hidrostático.

$$\text{Periodos: } y = \begin{cases} 0.003177x^3 - 0.03321x^2 + 0.111x + 0.2136 & R^2 = 0.9408 \\ 0.003026x^3 - 0.031372x^2 + 0.1107x + 0.1796 & R^2 = 0.9693 \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\text{Alturas: } y = \begin{cases} 1.4459e^{-16.72x} + 0.4179e^{-2.09x} & R^2 = 0.9997 \\ 1.093e^{-10.83x} + 0.20357e^{-0.4519x} & R^2 = 0.9999 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$\text{Números de Manning: } y = \begin{cases} -9.31x^2 + 0.08658x + 0.3338 & R^2 = 0.9922 \\ -1.233x^2 - 0.1619x + 0.3163 & R^2 = 0.9994 \end{cases} \quad (4.7)$$

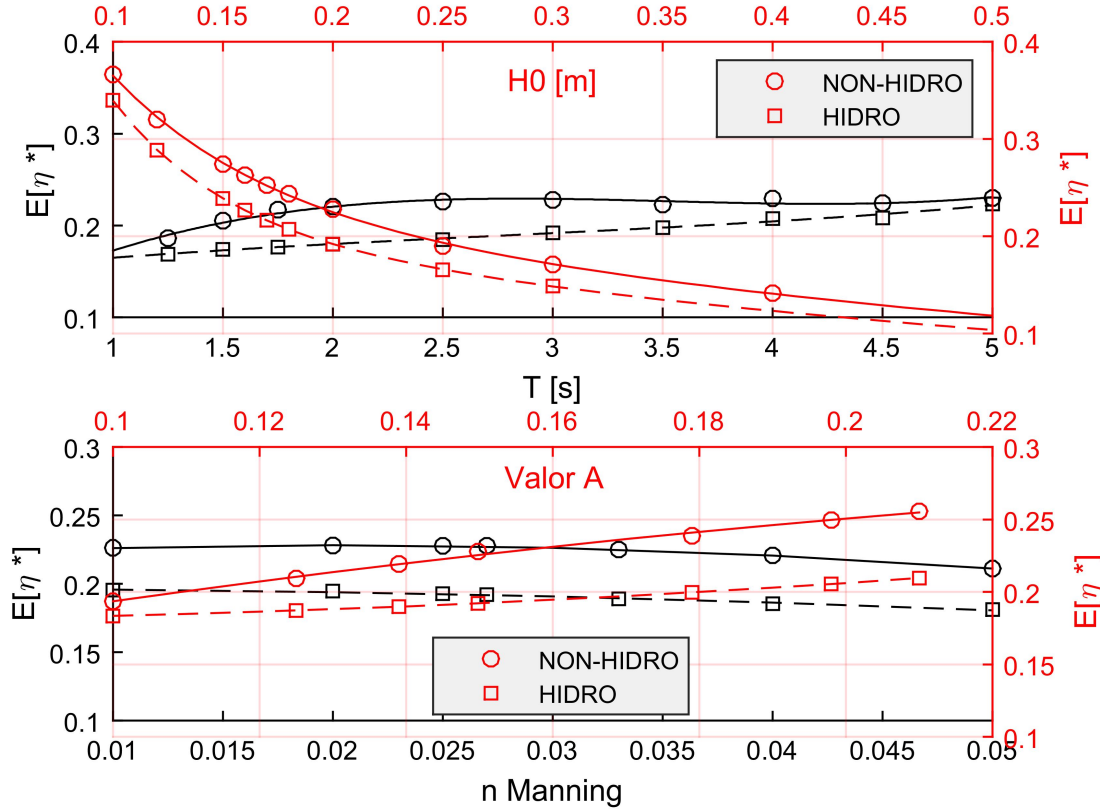


Figura 4.14 Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor A (en rojo).

$$\text{Valor A: } y = \begin{cases} 0.4303x + 0.2637 & R^2 = 0.998 \\ 0.1092x + 0.2954 & R^2 = 0.9693 \end{cases} \quad (4.8)$$

Una vez mostradas las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del setup en función de los distintos parámetros y con ayuda de la tabla 4.2, podemos sacar ciertas conclusiones:

A pesar de mostrarse la influencia de cada parámetro en el setup por separado, no es hasta que se observan todos en conjunto cuando realmente podemos comprobar la importancia de cada uno en la cota de inundación de una playa.

El periodo de una ola influye algo en la variación del setup de una playa, sobre todo en periodos bajos. Un variación de 4 veces el periodo supone un aumento del 23% del setup adimensional, a pesar de que en periodos altos el incremento de setup sea más bajo. La altura de ola supone uno de los factores determinantes de la caracterización del setup en esta configuración de playa. Un aumento de $H_0 = 0.1\text{m}$ a $H_0 = 0.4\text{m}$ supone un descenso del 60% en el setup adimensional. El número de Manning influye poco en el setup. Se produce una variación del -7% entre valores extremos. Sin embargo, el valor del coeficiente A tiene influencia alta en el setup, a pesar de no ser una de las determinantes.

Tabla 4.2 Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo en equilibrio dinámico.

Párametro		Valor mínimo	η^* mínimo	η^* base	Valor máximo	η^* máximo	Diferencia η^*	Incremento (%)
T (s)	NH	1.25	0.1862	0.2279	5	0.2300	0.0438	23.52
	H	1.25	0.1686	0.1920	5	0.2234	0.0548	32.50
H0 (m)	NH	0.1	0.3665	0.2279	0.4	0.1416	-0.2249	-61.36
	H	0.1	0.3398	0.1920	0.3	0.1490	-0.1908	-56.15
n	NH	0.01	0.2263	0.2279	0.05	0.2111	-0.0152	-6.72
	H	0.01	0.1953	0.1920	0.04	0.1812	-0.0141	-7.22
Valor A	NH	0.1	0.1935	0.2279	0.21	0.2557	0.0622	32.14
	H	0.1	0.1834	0.1920	0.21	0.2095	0.0261	14.23

Conocida la influencia de cada parámetro en la variación del setup podemos sacar varias conclusiones:

- Nos encontramos un perfil en el que a pesar de existir parámetros mas importantes e influyentes que otros, suponen algo más de variación en el setup que en un perfil inclinado.
- E valor A es un parámetro que influye bastante en la determinación del setup, una variación del valor supondría una modificación de toda la composición de la playa (recordamos que este valor depende del D_{50} de las partículas).
- A pesar de que una modificación en la fricción de fondo provoque poca variación en el setup, parece ser uno de los parámetros más fáciles y baratos de modificar.
- Parece ser que la altura de ola influye bastante en el setup de una playa por lo que sería interesante elementos que puedan modificar este parámetro.
- Tanto periodo como altura de ola son parámetros difíciles de controlar, ya que dependen de la meteorología y de la situación del mar.

Finalmente y comparándolo con la configuración anterior, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Una variación del periodo igual en ambas configuraciones provoca una variación del setup adimensional mayor en la configuración de playa en equilibrio dinámico.
- La altura de ola sufre una variación del setup adimensional similar en ambas, aunque el valor del setup es mayor en el perfil de equilibrio dinámico.
- La fricción de fondo influye menos en esta configuración que en el fondo inclinado.

4.4 Perfil en equilibrio dinámico con barra

4.4.1 Caso base

Como se ha establecido en el capítulo anterior, el caso base en esta configuración de playa es el siguiente:

- $H_0 = 0.2\text{m}$

- $T = 3s$
- $n = 0.027$
- $ValorA = 0.1498$
- $\delta_0 = 0.1$

Nos encontramos en una configuración muy similar a la anterior por lo que parece que todas la suposiciones realizadas en el caso base pueden ser aplicadas a este caso. La presencia de una barra cercano a la zona de rotura, parece indicar que puede afectar a la evolución de velocidad, setup o H_{sig} en el dominio. La presencia de barra se intuye que reducirá valores de setup.

El caso base ejecutado tiene como resultados las imágenes 4.15 y 4.16. La presencia de la barra en este perfil es notable. La barra supone una disminución en el setup máximo alcanzado, además de reducir la velocidad en la línea de costa y modificar la H_{sig} en las inmediaciones de su localización. Se produce un aumento de velocidad en la localización de la barra. Las diferencias entre el modo hidrostático y el modo no-hidrostático continúan siendo evidentes.

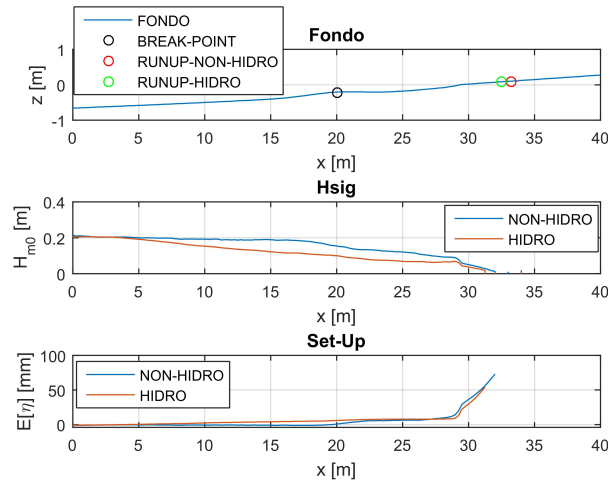


Figura 4.15 Perfil, punto de rotura, runup, setup, y Hsig del caso base del perfil en equilibrio dinámico con barra.

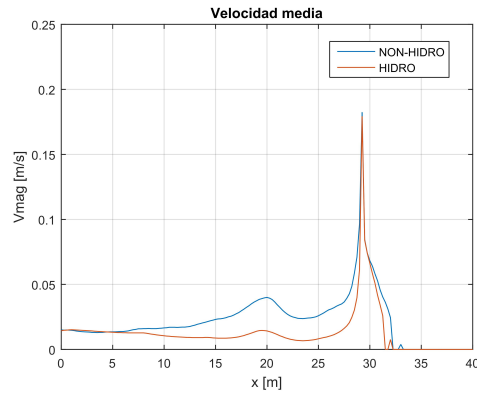


Figura 4.16 Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil en equilibrio dinámico con barra.

4.4.2 Variación de altura de ola

Comenzamos estudiando la variación del setup en función de ir modificando la altura de ola. Los resultados obtenidos en las demás configuraciones nos hacen tener cierta idea de la tendencia y la forma de la gráfica. La adimensionalización se ha realizado aplicando la ecuación 3.10.

Como se observa en la imagen 4.17, la gráfica tiene una tendencia lineal y la gráfica adimensional tiene es muy parecida a las de las anteriores configuraciones por lo que la expresión que la representa será exponencial. Los valores de setup son algo menores que en el perfil en equilibrio dinámico por la presencia de la barra.

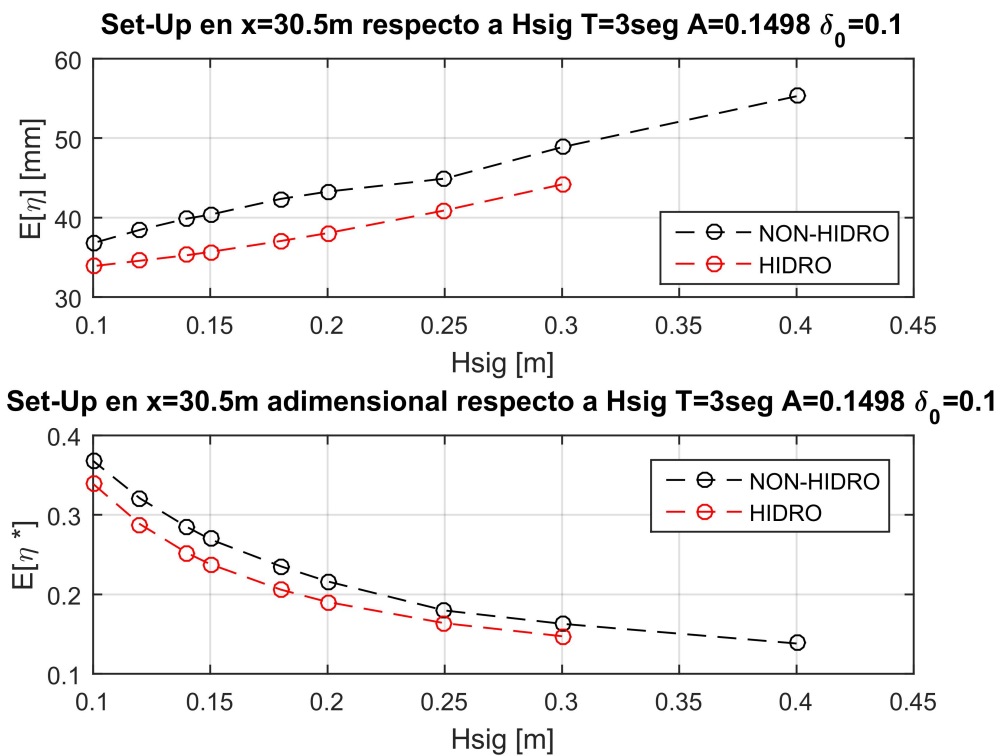


Figura 4.17 Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$.

4.4.3 Variación del periodo

Para esta configuración se ha variado el periodo en el rango de valores expuestos en la metodología y se han obtenido los siguientes resultados en la imagen 4.18.

De nuevo, se observa la misma tendencia que en la configuración anterior. Una variación de periodo en los valores más bajos estudiados provoca una variación de setup mayor que en los valores mas grandes de periodo estudiados. En los periodos mayores, el setup tiene una tendencia lineal, casi constante.

La diferencia entre ambos modos se acentúa en los periodos bajos e intermedios, reduciéndose dicha diferencia en valores de periodo grandes. El modo hidrostático parece que funciona mejor

para periodos altos.

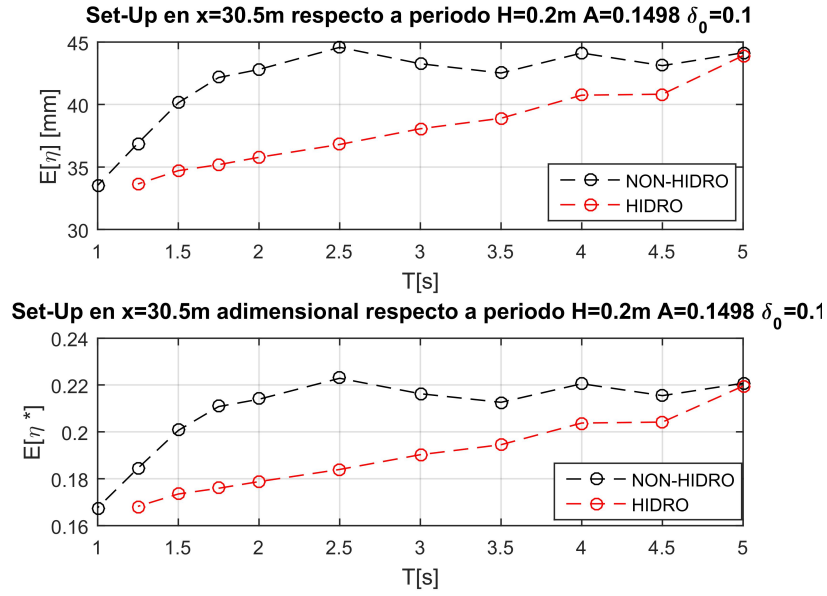


Figura 4.18 Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$.

4.4.4 Variación de la fricción de fondo

En la imagen 4.19 se observa que los valores pequeños de fricción son aparentemente lineales. A medida que aumentamos la fricción, el setup baja cada vez más.

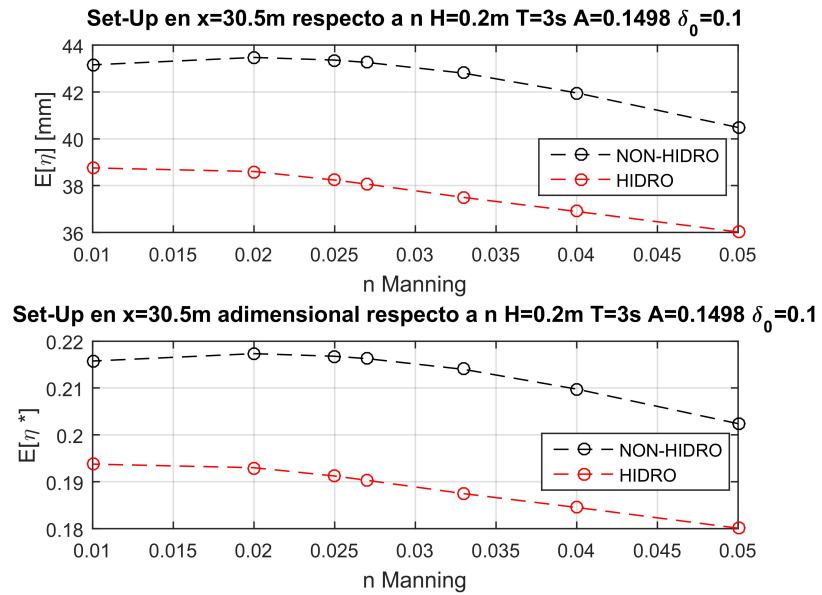


Figura 4.19 Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$.

4.4.5 Variación del valor A

La tendencia lineal en la imagen 4.20 en ambos modos es evidente. La única diferencia es que a medida que se aumenta el valor A, la diferencia de setup entre ambos modos se hace mayor. El modo hidrostático es más fiable en pequeños valores de A.

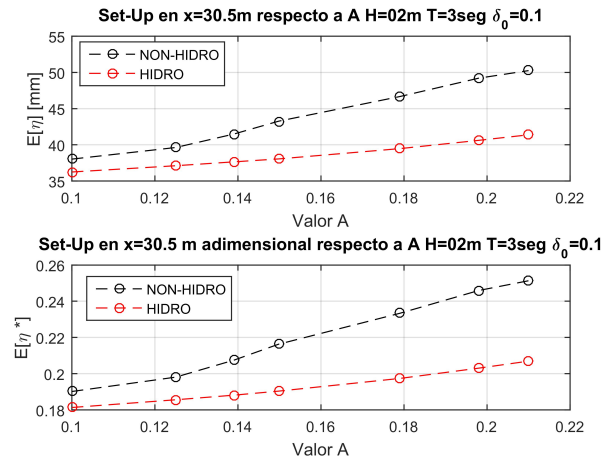


Figura 4.20 Variación del setup respecto al valor A en $x = 30.5\text{m}$. Fondos en equilibrio dinámico con barra $\delta_0 = 0.1$.

4.4.6 Variación de delta

En este aparatado se ha variado el valor δ_0 para comprobar como influye en el setup la presencia de la barra según su altura.

En la imagen 4.21 se observa que existe un valor de δ_0 que minimiza el setup. Un valor mayor o menor a éste provoca mayor setup. En el modo hidrostático no se produce esto.

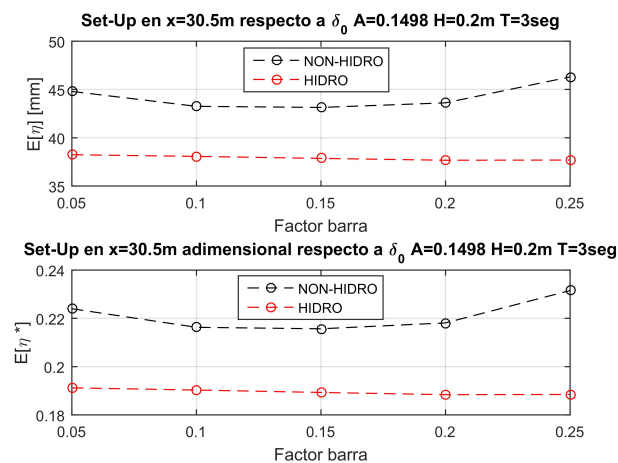


Figura 4.21 Variación del setup respecto al valor δ_0 en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$.

4.4.7 Comparación de todos los parámetros

Para finalizar con el estudio de los parámetros que influyen en el setup de esta configuración, es necesario comparar los resultados obtenidos entre ellos para obtener el más influyente y poder obtener ciertas conclusiones.

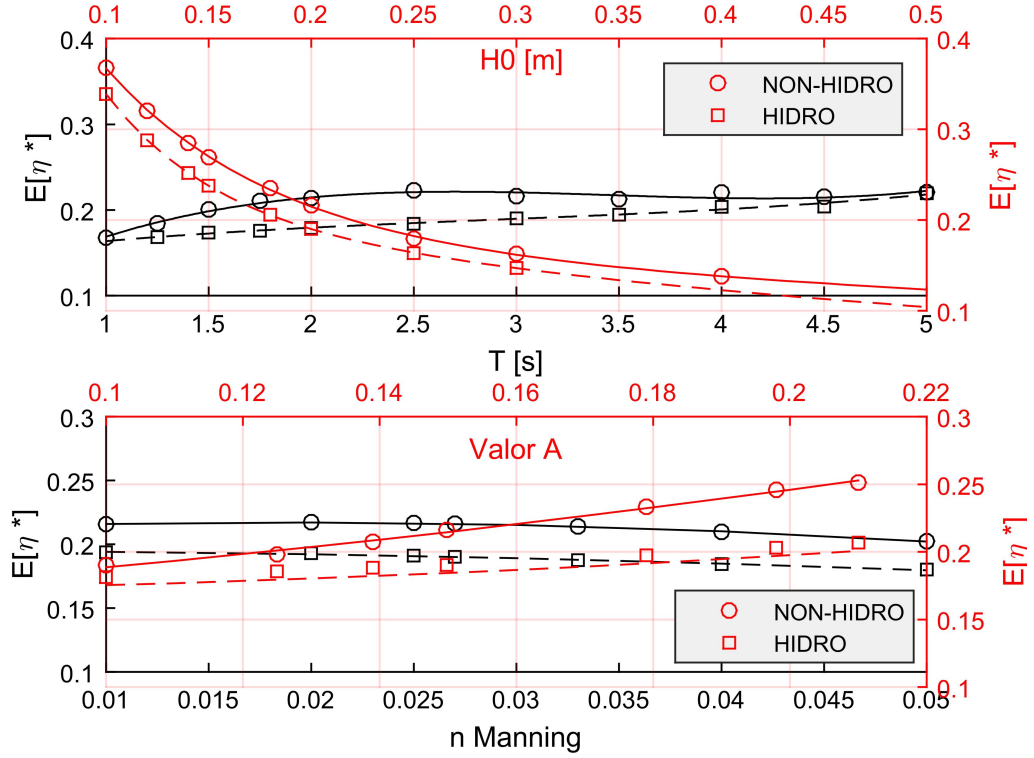


Figura 4.22 Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor A (en rojo).

Las ecuaciones 4.9, 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 describen cada uno de los ajustes realizados. La ecuación de arriba se corresponde a la línea continua, en régimen no-hidrostático, y ecuación de abajo, que se corresponde a la línea discontinua, en régimen hidrostático

$$\text{Periodos: } y = \begin{cases} 0.003053x^3 - 0.03165x^2 + 0.1033x + 0.2201 & R^2 = 0.8436 \\ 0.003535x^3 - 0.03686x^2 + 0.1285x + 0.1612 & R^2 = 0.9532 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\text{Alturas: } y = \begin{cases} 1.426e^{-15.59x} + 0.3723e^{-1.846x} & R^2 = 0.9998 \\ 0.4052e^{-2.204x} + 1.445e^{-16.83x} & R^2 = 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

$$\text{Números de Manning: } y = \begin{cases} -5.594x^2 + 0.0132x + 0.3263 & R^2 = 0.9889 \\ -2.979x^2 - 0.06659x + 0.3148 & R^2 = 0.9998 \end{cases} \quad (4.11)$$

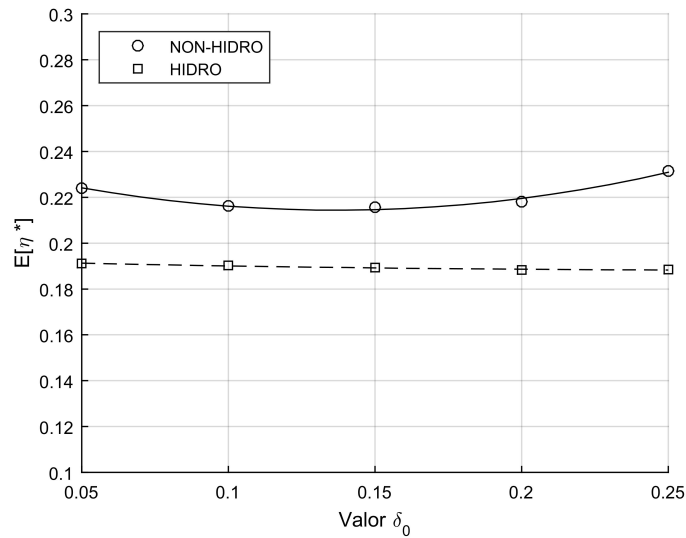


Figura 4.23 Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra. Se compara el valor δ_0 (en negro)..

$$\text{Valor A: } y = \begin{cases} 1.388x^2 + 0.002084x + 0.2907 & R^2 = 0.9961 \\ 0.6977x^2 - 0.1341x + 0.3149 & R^2 = 0.99 \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{Valor delta } y = \begin{cases} 0.6354x^2 - 0.1796x + 0.3344 & R^2 = 0.9883 \\ -0.02743x^2 + 0.001629x + 0.3109 & R^2 = 0.9989 \end{cases} \quad (4.13)$$

Una vez mostradas las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del setup en función de los distintos parámetros y con ayuda de la tabla 4.3, podemos sacar ciertas conclusiones:

Tabla 4.3 Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo en equilibrio dinámico con barra.

Parámetro		Valor mínimo	η^* mínimo	η^* base	Valor máximo	η^* máximo	Diferencia η^*	Incremento (%)
T (s)	NH	1	0.1676	0.2163	5	0.2207	0.0531	31.68
	H	1.25	0.1682	0.1903	5	0.2195	0.0513	30.50
H0 (m)	NH	0.1	0.3679	0.2163	0.4	0.1382	-0.2297	-62.44
	H	0.1	0.339	0.1903	0.3	0.1473	-0.1917	-56.55
n	NH	0.01	0.2158	0.2163	0.05	0.2024	-0.0134	-6.21
	H	0.01	0.1938	0.1903	0.05	0.1801	-0.0137	-7.07
Valor A	NH	0.1	0.1902	0.2163	0.21	0.2513	0.0611	32.12
	H	0.1	0.1813	0.1903	0.21	0.2063	0.0250	13.79
Delta	NH	0.05	0.224	0.2163	0.25	0.2315	0.0075	3.35
	H	0.05	0.1912	0.1903	0.25	0.1885	-0.0027	-1.41

La visualización de todos los parámetros en conjunto ayuda a conocer la importancia de cada uno de ellos.

El periodo de una ola influye algo en la variación del setup de una playa, sobre todo en periodos bajos. Un variación de 5 veces el periodo supone un aumento del 31 % del setup adimensional. La mayor variación de setup se produce en los valores bajos de los periodos estudiados. La altura de ola supone uno de los factores determinantes de la caracterización del setup en esta configuración de playa. Un aumento de $H_0 = 0.1\text{ m}$ a $H_0 = 0.4\text{ m}$ supone un descenso del 60 % en el setup adimensional. El número de Manning influye poco en el setup. Se produce una variación del -6 % entre valores extremos. El valor A influye bastante en el setup y el valor δ_0 es el menos influyente (apenas un 3 % entre valores extremos) pero supone una variación del 7 % entre su valor mínimo de setup y su valor máximo (cabe recordar que hay un valor δ_0 que minimiza el setup).

Conocida la influencia de cada parámetro en la variación del setup podemos sacar varias conclusiones:

- El valor A es un parámetro que influye bastante en la determinación del setup, una variación del valor supondría una modificación de toda la composición de la playa (recordamos que este valor depende del D_{50} de las partículas).
- A pesar de que una modificación en la fricción de fondo provoque poca variación en el setup, parece ser uno de los parámetros más fáciles y baratos de modificar.
- Parece ser que la altura de ola influye bastante en el setup de una playa por lo que sería interesante elementos que puedan modificar este parámetro.
- Tanto periodo como altura de ola son parámetros difíciles de controlar, ya que dependen de la meteorología y de la situación del mar.
- La barra posee un valor que reduce al mínimo el setup. Dependiendo de la forma de la playa sería interesante encontrar ese mínimo.

Finalmente y comparándolo con las configuraciones anteriores, se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Este perfil tiene provoca más setup en la playa que un perfil inclinado, pero menos que un perfil en equilibrio dinámico por la presencia de la barra.
- La altura de ola sufre una variación del setup adimensional similar en todas, aunque el valor del setup es mayor en el perfil de equilibrio dinámico.
- La fricción de fondo influye menos en esta configuración que en el fondo inclinado.
- La presencia de la barra en conjunto con la de la fricción, combinándolos encontrando un óptimo, podrían reducir el setup considerablemente.

4.5 Presencia de vegetación

La presencia de vegetación influye algo en el oleaje de la playa, pero la los cambios que produce son pequeños. Se ha comparado la H_{sig} (imagen 4.24), el setup (imagen 4.25), el setup adimensional (imagen 4.26) y la velocidad de flujo (imagen 4.27) entre el caso base de perfil de equilibrio dinámico con barra 4.15 y el caso base establecido con vegetación (recordemos que era con 10 plantas por metro lineal y 0.1 m de altura).

Se observan en las imágenes 4.24, 4.25, 4.26 y 4.27 que la diferencia entre las magnitudes es mínima, y apenas se diferencia. El valor de la vegetación es algo menor. La altura de ola (imagen

4.24) en presencia de la vegetación presenta valores algo menores después de la rotura de la ola. El setup (imagen 4.25) y el setup adimensional (imagen 4.26) presentan valores similares con y sin vegetación casi en todo el dominio. Es en la parte final, el setup máximo donde aparece cierta diferencia, pero es mínima. La velocidad del flujo (imagen 4.27) se ve algo reducida una vez superada la barra.

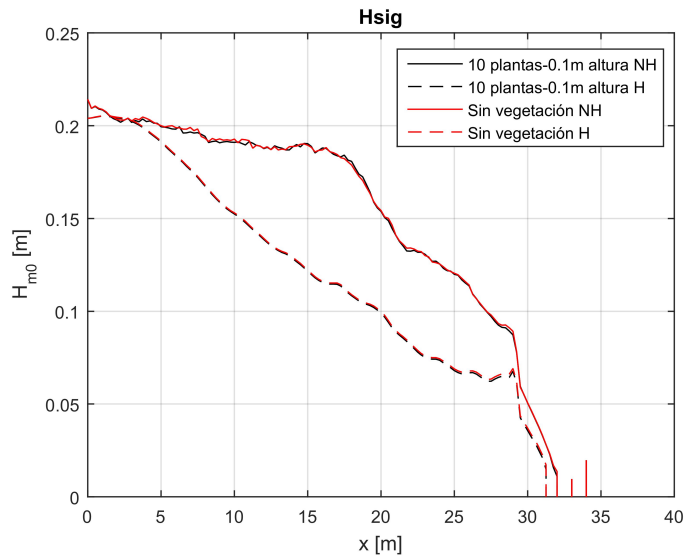


Figura 4.24 Comparación H_{sig} entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro).

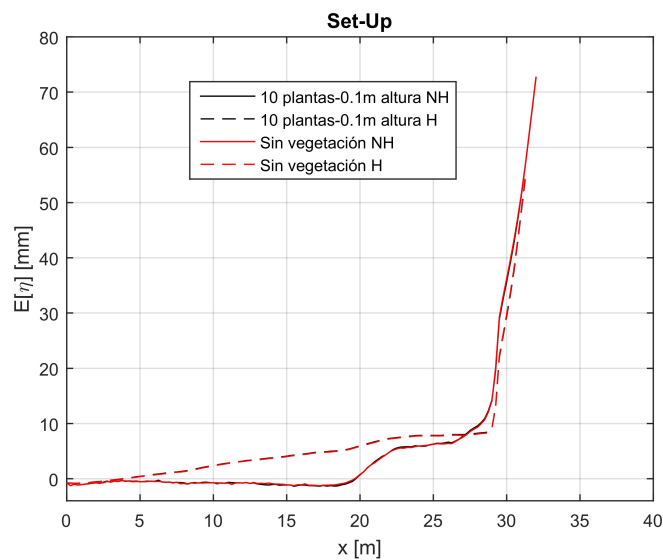


Figura 4.25 Comparación setup entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro).

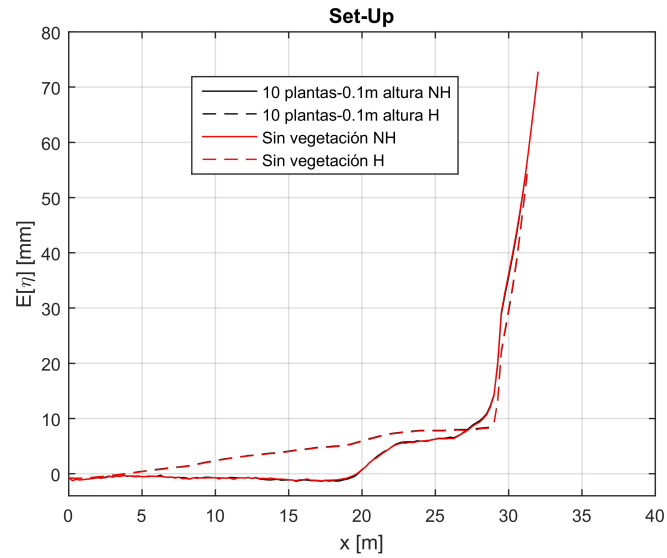


Figura 4.26 Comparación de setup adimensional entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro).

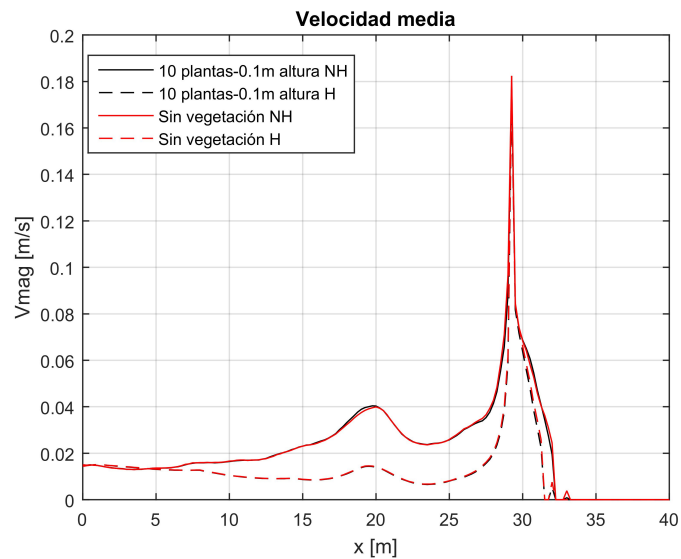


Figura 4.27 Comparación de velocidad de flujo entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro).

También se ha comparado como influye el número de plantas por metro lineal 4.28 y la altura de planta 4.29 en el setup y cómo se ve reducido. Se observa que descende el setup con la presencia de más vegetación y de más altura, pero la diferencia es muy pequeña. La comparación se ha realizado en el punto de estudio establecido en el Capítulo 3.

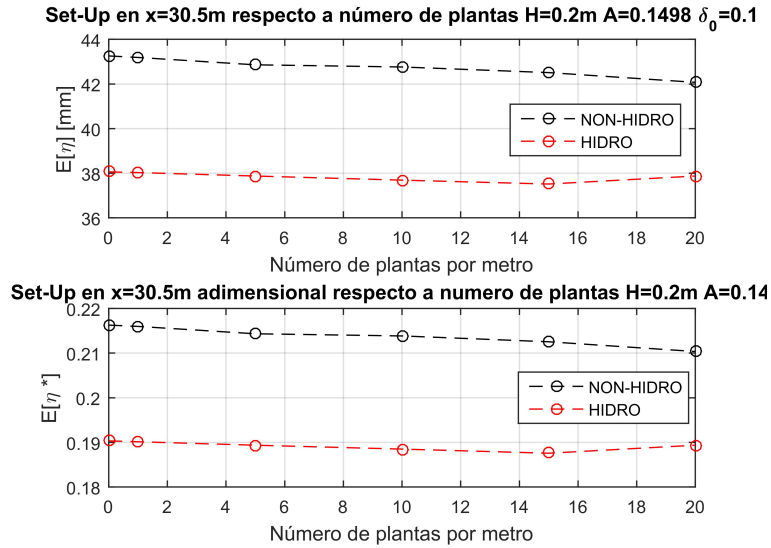


Figura 4.28 Comparación setup en $x = 30.5\text{m}$ en función del número de plantas por metro lineal.

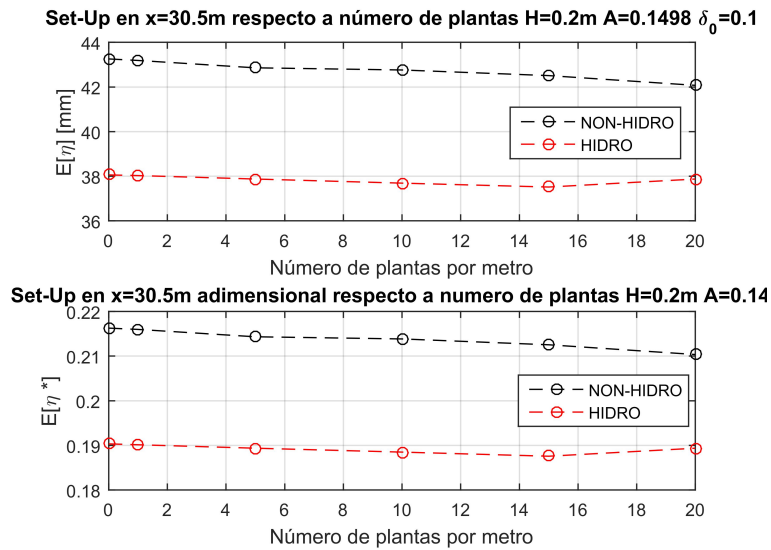


Figura 4.29 Comparación setup en $x = 30.5\text{m}$ en función de la altura de planta.

Para cuantificar que porcentaje de setup se reduce, se ha construido la tabla 4.4 en la que se observa que el el número de plantas supone una variación de casi el 3 % de pasar de no tener plantas a 20 por metro lineal. La altura de la planta influye algo menos, no llega al 2 %.

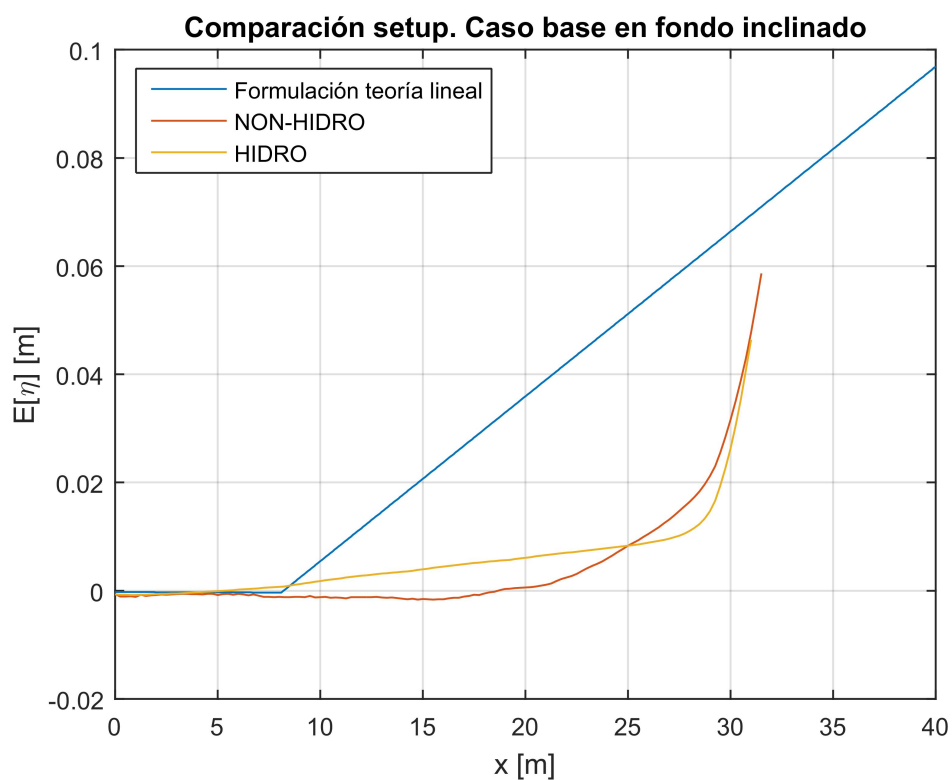
Tabla 4.4 Resultados obtenidos de los diferentes parámetros sobre la vegetación.

Párametro		Valor mínimo	η^* mínimo	Valor máximo	η^* máximo	Diferencia η^*	Incremento (%)
Nº plantas	NH	0	0.2163	20	0.2104	-0.0059	-2.73
	H	0	0.1903	20	0.1894	-0.0009	-0.47
Altura plantas	NH	0.05	0.2153	0.25	0.2115	-0.0038	-1.76
	H	0.05	0.1892	0.25	0.1871	-0.0021	-1.11

4.6 Comparación resultados del modelo con distintas formulaciones

4.6.1 Perfil inclinado

A pesar de que si comparamos en 4.30 los resultados obtenidos del programa y los de la formulación basada en la teoría lineal difieren bastante, sus valores máximos se aproximan bastante.

**Figura 4.30** Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo inclinado.

Si comparamos estos valores con las formulaciones empíricas expuestas, observamos bastante diferencia entre los resultados obtenidos por dichas formulaciones y los obtenidos mediante el programa SWASH.

Tabla 4.5 Datos usados en el cálculo de las fórmulas empíricas. Fondo inclinado.

H0 (m)	0.197
L0 (m)	14.04
tan β	0.025
cg0 (m/s)	2.34
c0 (m/s)	4.68
T (s)	3
H (m)	0.2
d (m)	0.75
c (m/s)	2.54
cg (m/s)	2.26
k (m-1)	0.818

Tabla 4.6 Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo inclinado.

TEORÍA	η (m)	Error (%)
NH	0.0587	0
H	0.0464	-20.95
TEORÍA LINEAL	0.07159	21.96
GUZA	0.03349	-42.95
HOLMAN	0.0187	-68.14

Para los valores obtenidos se ha usado la teoría lineal de ondas. Los valores obtenidos de setup máximo de las formulaciones difieren mucho. La formulación basada en la teoría lineal como vemos en la figura 4.30 nos ofrece valores mayores que el programa, estando del lado de la seguridad. Las formulaciones empíricas nos dan valores mucho menores. Esto puede ser debido a que la playa de estudio no sea parecida a las playas estudiadas para obtener dichas fórmulas.

4.6.2 Perfil en equilibrio dinámico

Los resultados obtenidos por la formulación basada en la teoría lineal se encuentran en la imagen 4.31. Los valores obtenidos de las formulaciones empíricas y los errores obtenidos están en las tablas 4.7 y 4.7.

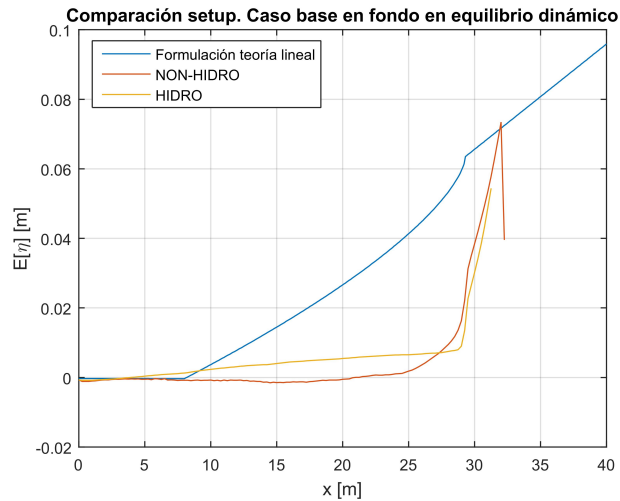


Figura 4.31 Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo en equilibrio dinámico.

Tabla 4.7 Datos usados en el cálculo de las fórmulas empíricas. Fondo en equilibrio dinámico.

H0 (m)	0.193
L0 (m)	14.04
tan β	0.026
cg0 (m/s)	2.34
c0 (m/s)	4.68
T (s)	3
H (m)	0.2
d (m)	0.6608
c (m/s)	2.42
cg (m/s)	2.19
k (m-1)	0.865

Tabla 4.8 Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo en equilibrio dinámico.

TEORÍA	η(m)	Error (%)
NH	0.0734	0.00
H	0.0608	-17.17
TEORÍA LINEAL	0.07168	-2.34
GUZA	0.03281	-55.30
HOLMAN	0.01924	-73.79

En este caso el modo no-hidrostático ofrece el mayor setup. La formulación basada en la teoría lineal es la que más se acerca. Las fórmulas empíricas son las mas alejadas del valor base.

4.6.3 Perfil en equilibrio dinámico con barra

Los resultados obtenidos por la formulación basada en la teoría lineal y comparados con los resultados obtenidos en SWASH son los siguientes:

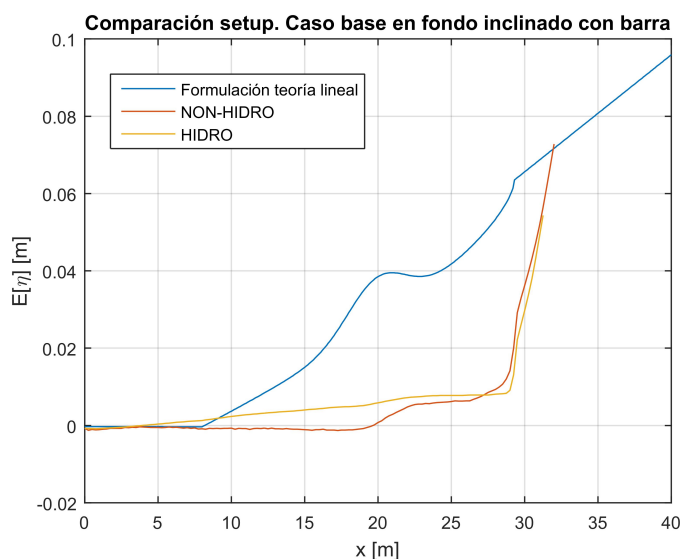


Figura 4.32 Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo en equilibrio dinámico con barra.

Los valores obtenidos de las formulaciones empíricas y los errores obtenidos son los siguientes:

Los datos usados son los mismos que se han obtenido en la tabla 4.7

Tabla 4.9 Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo en equilibrio dinámico con barra.

TEORÍA	η (m)	Error (%)
NH	0.0728	0.00
H	0.0608	-16.48
TEORÍA LINEAL	0.07168	-1.54
GUZA	0.03281	-54.93
HOLMAN	0.01924	-73.57

La presencia de la barra baja algo el setup máximo en el modo no-hidrostático. Al permanecer todos los demás valores iguales el error cometido es menor.

5 Conclusiones. Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos tanto de cada una de las configuraciones y de los parámetros que las definen como de las formulaciones estudiadas, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- De las tres configuraciones estudiadas, todo parece indicar que la que mejor disipa la energía, es decir, la que tiene menor setup máximo, es el perfil inclinado. Los perfiles de equilibrio dinámico con y sin barra disipan peor la energía al tener un perfil parabólico y el setup alcanzado es mayor, además, el agua tiene más alcance en la zona seca. Sin embargo, el perfil inclinado es inestable, y por lo tanto, se correspondería a una situación ideal. El perfil que va a tender a formarse va a ser un perfil en equilibrio dinámico, y, dependiendo de factores climáticos, se formará o no la barra. Estas configuraciones generan más setup, pero son los fondos que más se asemejan con la realidad.
- El periodo de ola influye de igual manera independientemente de la configuración de playa. Una variación de periodo en rangos bajos genera un cambio grande de setup, mientras que éste se estabiliza en valores de periodos altos.
- La altura de ola es uno de los parámetros que más influye, algo bastante lógico porque las mayores inundaciones se generan en épocas de temporal. Sería interesante el estudio de elementos o construcciones que reduzcan la altura de ola en zonas donde el setup sea un problema.
- Los parámetros que definen la configuración de playa, ya sea la pendiente en el fondo inclinado, o el valor A en los fondos de equilibrio dinámico con o sin barra, son elementos que influyen bastante en el setup de una playa. Sin embargo, su modificación se antoja difícil ya que se tendría que variar casi todo aquello que compone una playa. El valor A está relacionado con el D_{50} por lo que una variación en este valor, supone un cambio en las partículas que conforma la playa.
- El valor de la fricción de fondo no genera enorme variación en el setup en todas las configuraciones, pero parece ser el parámetro más barato y fácil a modificar. Variar este parámetro provocaría la modificación de la altura de ola, con lo que el setup se vería reducido considerablemente.
- La barra en la configuración de equilibrio dinámico propone, según su altura, una reducción del setup. Según la altura de la barra la reducción del setup es mayor o menor. Existe un valor en el que se produce la mayor reducción de setup. El valor se encuentra entre valores de δ_0

de 0.1 a 0.15.

- Las diferencias entre ambos modos de cálculo que permite SWASH (hidrostático y no-hidrostático) pueden verse en cada uno de los casos que se han ejecutado. Las mayores diferencias se producen una vez rota la ola, donde los términos no hidrostáticos cobran importancia. La presencia de barra en el modo hidrostático apenas consigue variar el setup, sin embargo en el otro modo la presencia de barra provoca un cambio algo mayor en éste.
- A pesar de realizar comentarios sobre qué modo parece funcionar mejor basado en el comportamiento físico de los resultados, harían falta ensayos de laboratorio para poder saber realmente qué modo funciona mejor.
- La presencia de vegetación en el fondo reduce simbólicamente el setup. La implantación de numerosas plantas y la poca reducción de setup hacen que esta solución no sea muy útil.

5.2 Recomendaciones

Conocidas las conclusiones que se han obtenido a partir de la realización de este proyecto, y para evitar el problema del setup, se van a exponer una serie de recomendaciones para conocer, evaluar, y reducir la cota de inundación.

- Si se desea realizar una primera aproximación para conocer el valor del setup, sería interesante utilizar las formulaciones expuestas en este trabajo. Si se desea conocer la evolución del setup en todo el dominio, la única formulación que se puede usar, además de los resultados de SWASH, es la basada en la teoría lineal. A lo largo del dominio existe bastante diferencia entre ambos, siendo el setup basado de la teoría lineal mucho mayor, y por tanto, estando del lado de la seguridad. En la zona cercana a donde se produce el setup máximo estas diferencias se hacen mucho menores. Si se desea tener una primera idea del comportamiento del setup en el dominio y, sobre todo, en la zona donde se produce el setup máximo, se podría emplear la formulación basada en la teoría lineal. Si se desea conocer el setup con mayor detalle y finura, el programa SWASH ofrece mejores resultados siempre que se recree con exactitud la realidad.

Las formulaciones empíricas 2.15 y 2.16 ofrecen unos valores del setup mucho más bajos que los obtenidos por SWASH y 2.14. Esto se debe a que las constantes que se aplican en las fórmulas dependen de la zona de estudio, y no puede extrapolarse a cualquier caso. Si la zona de estudio es similar a las zonas de las que se obtuvieron dichas formulaciones, sería interesante su aplicación, con el objetivo de tener una primera aproximación del valor del setup que se va a obtener.

- El valor de altura de ola es determinante en el setup y es muy difícil de controlar, ya que, como se ha mencionado en las conclusiones, no podemos controlar la llegada de un temporal. Si se desea una reducción del setup efectiva y a coste mínimo, se ha comprobado que el mejor parámetro a modificar es la fricción de fondo. Si modificar este parámetro no fuese suficiente, se debería complementar buscando la altura de barra óptima (si hubiese barra) y con la inclusión de vegetación en el fondo. Se ha estudiado cada uno de estos parámetros por separado viendo como influye cada uno en el setup, pero sería interesante ver como funcionan todos en conjunto, y ver si esa variación de setup se ve potenciada.

5.3 Futuras líneas de investigación

Conocer el valor del setup es un aspecto importante en el estudio de dinámica litoral, y más aún en un país cuya economía depende tanto de la costa. Este aspecto va a ir cogiendo importancia como consecuencia del cambio climático y el aumento del nivel medio del mar, no sólo para proteger la zona costera, sino para evitar pérdidas humanas.

La vegetación parece ser uno de los elementos de futuro para evitar el setup no deseado en zonas críticas, pero aún queda bastante por investigar. Conocer qué tipologías de vegetación, densidades de plantas, alturas de plantas, e incluso, diámetros de vegetación son óptimos para conseguir la reducción deseada es un campo bastante amplio de estudio y que va a ser con toda seguridad bastante importante en el futuro. La tipología de planta escogida reduce poco el setup, por lo que sería interesante encontrar otras tipologías que funcionen de una manera más eficiente.

En el setup no sólo estos parámetros estudiados son los que influyen. Sería necesario establecer todos los parámetros influyentes, y estudiar todos y cada uno de ellos por separados y en conjunto. La orientación del oleaje sería un parámetro interesante a estudiar en futuras investigaciones. En este trabajo solo no se ha realizado estudio 2D, pero sería necesario en futuras investigaciones para dotar de cierto realismo las conclusiones expuestas.

La dinámica costera es impredecible y aleatoria como las variables que la componen, pero investigando se podrían obtener tendencias y algo de predicción.

Índice de Figuras

1.1	Destrozos en el paseo marítimo de Cubelles (Barcelona) debido a un temporal. Enero 2017	2
1.2	Zona de rompientes. Run-up, set-up y swash	2
1.3	Inundación por crecida del río Ebro en Pradilla (Zaragoza). Abril 2018	3
2.1	Localización de zona de rompientes o 'surf zone'	5
2.2	Set-down en zona de rotura y set-up	6
2.3	Representación set-up y set-down formula matemática	9
3.1	Fondo inclinado base. Talud 1/40 o $tg\beta = 0.025$	16
3.2	Valores del parámetro A en función del tamaño de sedimento	17
3.3	Perfil en equilibrio dinámico base. $A = 0.1498$	17
3.4	Perfil en equilibrio dinámico con barra base. $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$	18
3.5	Perfiles inclinados con diferente talud usados	20
3.6	Perfiles en equilibrio dinámico con diferente valores de A usadas	21
3.7	Perfiles en equilibrio dinámico con barra con diferente valores de A usadas. $\delta_0 = 0.1$	21
3.8	Perfiles en equilibrio dinámico con barra con diferente valores de δ_0 usados. $A = 0.1498$	22
3.9	Lugar de estudio del setup en las diferentes configuraciones de playa	28
4.1	Perfil, punto de rotura, runup, setup, y Hsig del caso base del perfil inclinado	32
4.2	Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil inclinado	32
4.3	Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5m$. Fondo inclinado 1/40	33
4.4	Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5m$. Fondo inclinado 1/40	34
4.5	Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5m$. Fondo inclinado 1/40	34
4.6	Variación del setup respecto a la pendiente del fondo en $x = 30.5m$. Fondos inclinados	35
4.7	Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5m$. Fondo inclinado. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor $tg\beta$ (en rojo)	36
4.8	Perfil, punto de rotura, runup, setup, y Hsig del caso base del perfil en equilibrio dinámico	38
4.9	Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil en equilibrio dinámico	38
4.10	Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5m$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$	39
4.11	Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5m$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$	40
4.12	Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5m$. Fondo en equilibrio dinámico $A = 0.1498$	40

4.13	Variación del setup respecto al valor A en $x = 30.5\text{m}$. Fondos en equilibrio dinámico	41
4.14	Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor A (en rojo)	42
4.15	Perfil, punto de rotura, runup, setup, y Hsig del caso base del perfil en equilibrio dinámico con barra	44
4.16	Velocidad media (en magnitud) del caso base del perfil en equilibrio dinámico con barra	44
4.17	Variación del setup respecto a altura de ola en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$	45
4.18	Variación del setup respecto al periodo en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$	46
4.19	Variación del setup respecto al número de Manning en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$ y $\delta_0 = 0.1$	46
4.20	Variación del setup respecto al valor A en $x = 30.5\text{m}$. Fondos en equilibrio dinámico con barra $\delta_0 = 0.1$	47
4.21	Variación del setup respecto al valor δ_0 en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra $A = 0.1498$	47
4.22	Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra. En la gráfica de arriba, se compara el periodo (en negro) y las alturas de ola (en rojo). En la gráfica de abajo, se compara el número de Manning (en negro) y el valor A (en rojo)	48
4.23	Comparación del setup adimensional respecto a los diferentes parámetros que caracterizan la playa en $x = 30.5\text{m}$. Fondo en equilibrio dinámico con barra. Se compara el valor δ_0 (en negro).	49
4.24	Comparación H_{sig} entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro)	51
4.25	Comparación setup entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro)	51
4.26	Comparación de setup adimensional entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro)	52
4.27	Comparación de velocidad de flujo entre caso base de fondo en equilibrio dinámico con barra (rojo) y caso base con vegetación (negro)	52
4.28	Comparación setup en $x = 30.5\text{m}$ en función del número de plantas por metro lineal	53
4.29	Comparación setup en $x = 30.5\text{m}$ en función de la altura de planta	53
4.30	Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo inclinado	54
4.31	Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo en equilibrio dinámico	56
4.32	Comparación resultados setup entre teoría lineal y SWASH. Fondo en equilibrio dinámico con barra	57

Índice de Tablas

3.1	Valores de A y su D_{50} asociado	20
3.2	Casos estudiados con perfil inclinado	24
3.3	Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico	25
3.4	Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico con barra	26
3.5	Casos estudiados con perfil en equilibrio dinámico con barra (cont.)	27
3.6	Casos estudiados sobre la presencia de vegetación con perfil en equilibrio dinámico con barra	27
4.1	Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo inclinado	37
4.2	Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo en equilibrio dinámico	43
4.3	Resultados obtenidos de los diferentes parámetros y comparación. Fondo en equilibrio dinámico con barra	49
4.4	Resultados obtenidos de los diferentes parámetros sobre la vegetación	54
4.5	Datos usados en el cálculo de las fórmulas empíricas. Fondo inclinado	55
4.6	Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo inclinado	55
4.7	Datos usados en el cálculo de las fórmulas empíricas. Fondo en equilibrio dinámico	56
4.8	Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo en equilibrio dinámico	56
4.9	Valor de setup máximo de las formulaciones y errores. Fondo en equilibrio dinámico con barra	57

Bibliografía

- [1] Al Saady, M., -. Numerical study of regular and irregular wave interaction with vertical breakwaters. Master's thesis. Delft University of Technology.
- [2] Barrera Tomás, N., 2006. Influencia del oleaje en playas sobre lagunas costeras. Ph.D. thesis. Universidad Politécnica de Catalunya.
- [3] de Beer, A., 2017. The influence of incident waves on runup. A comparison between a phase-averaged and a phase-resolving XBeach model. Master's thesis. Delft University of Technology.
- [4] Clarindo Marcos, G., 2014. Evaluación de riesgo costero por inundación. Master's thesis. ULPGC.
- [5] Dean, R.G., Dalrymple, R.A., 2004. Coastal Processes with Engineering Applications. Cambridge.
- [6] Díaz Sánchez, R., 2014. Predicción del remonte extremo en playas: aplicación a los sectores litorales de la costa española. Ph.D. thesis. Universidad Politécnica de Madrid.
- [7] van Eeden, F., 2017. SWASH: A robust numerical model for shallow water coastal engineering applications. Master's thesis. Faculty of Engineering at Stellenbosch University.
- [8] Guza, R.T., Thornton, E.B., . Wave set-up on a natural beach. Journal of Geophysical Research: Oceans 86, 4133–4137. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JC086iC05p04133>, doi:10.1029/JC086iC05p04133, arXiv:<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/JC086iC05p04133>.
- [9] Holman, R., Sallenger, H.J.A., 1985. Setup and swash on a natural beach. Journal of Geophysical Research Atmospheres 90.
- [10] Longuet-Higgins, M., Stewart, R., 1964. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts 11, 529 – 562. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0011747164900014>, doi:[https://doi.org/10.1016/0011-7471\(64\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0011-7471(64)90001-4).
- [11] López Ruíz, A., . Hidrodinámica de la zona de rompientes. Apuntes de clase.
- [12] López Ruíz, A., Ortega-Sánchez, M., Putti, M., Lanzoni, S., M.A., L., . Rip currents on headland-bay and periodic beaches: influence of bay geometry, wave climate and presence of shoals. -.

- [13] Monteban, D., 2016. Numerical modelling of wave agitation in ports and access channels. Master's thesis. Delft University of Technology.
- [14] Nardin, W., Edmonds, D., Fagherazzi, S., 2016. Influence of vegetation on spatial patterns of sediment deposition in deltaic islands during flood. ELSEVIER .
- [15] Reeve, D., Chadwick, A., Fleming, C., 2004. Coastal engineering: processes, theory and design practice. Spon Press.
- [16] Smit, P., Janssen, T., Holthuijsen, L., Smith, J., 2014. Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics, in: Coastal Engineering. volume 83, p. 36–48.
- [17] Stockdon, H.F., Holman, R.A., Howd, P.A., Jr., A.H.S., 2005. Empirical parameterization of setup, swash, and runup. Coastal Engineering .
- [18] Technical University of Delft, . SWASH. User manual. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Environmental Fluid Mechanics Section. P.O. Box 5048 2600 GA Delft The Netherlands.
- [19] de Wit, F., 2016. Tide-induced currents in a phase-resolving wave model. Master's thesis. Delft University of Technology.
- [20] Young C., K., 2010. Handbook of coastal and ocean engineering. World Scientific.